

ORIGINAL ARTICLE

전산유체해석과 다구찌 및 미니탭 방법을 활용한 하수처리장 분배조 웨어 최적화

정용준 · 박해식¹⁾ · 조영만²⁾*

부산가톨릭대학교 환경공학과, ¹⁾부산환경공단, ²⁾부산광역시

Optimization of Distribution Basin Weirs at a Sewage Treatment Plant Based on Computational Fluid Analysis Using the Taguchi and Minitab Method

Yong-Jun Jung, Hae-Sik Park¹⁾, Young-Man Cho²⁾*

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

¹⁾Busan Environmental Corporation, Busan 47906, Korea

²⁾Busan Metrocity, Busan 47545, Korea

Abstract

The role of the distribution basin is to apportion incoming raw water to the primary sedimentation basin as part of the water treatment process. The purpose of this study was to calculate the amount of water in the distribution basin using computational fluid dynamics (CFD) analysis and to find a way to improve any non-uniformity. We used the Taguchi method and the minitab tool as optimization methods. The results of the CFD calculation showed that the distribution flow had a deviation of 5% at the minimum inflow, 10% at the average inflow, and 22% at the maximum inflow. At maximum flow, the appropriate heights of the 7 weirs(C, D, A, B, E, F, G) were 40 mm, 20 mm, 20 mm, 0, 0, 0, and 20 mm, respectively, according to the Taguchi optimization tool. Here, the maximum deviation of the distribution amount was 9% and the standard deviation was 23.7. The appropriate heights of the 7 weirs, according to the Minitab tool, were 40 mm, 20 mm, 20 mm, 0, 0, 0, and 20 mm, respectively, for weirs C, D, A, B, E, F, and G. Therefore, the maximum deviation of the distribution amount was 8% and the standard deviation was 17.1, which was slightly improved compared to the Taguchi method.

Key words : Computational Fluid Dynamics(CFD), Taguchi method, Mini tab, optimization, Distribution basin

1. 서론

수처리 공정에서 분배조는 어떤 단위공정에 처리수를 균등하게 분배하는 역할을 하는 시설로 대부분의 단위

공정 전단에 설치되어 있다. 즉 응집, 침전, 여과, 소독 등 대부분의 공정에 분배조가 설치되어 있다. 분배조의 기능은 단위공정에 처리수를 균등하게 분배하는 역할이지만 대부분 분배조는 특별한 시설이 되어 있지 않고 단순한

Received 1 October, 2021; Revised 2 December, 2021;

Accepted 6 December, 2021

*Corresponding author: Young-man Cho, Busan Metrocity, Busan 47545, Korea

Phone : +82-51-510-0625

E-mail: cho12211@daum.net

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

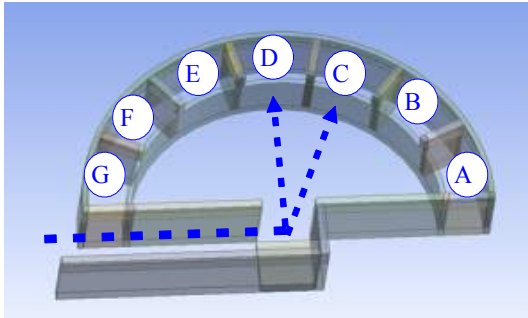


Fig. 1. Top view of distribution basin.

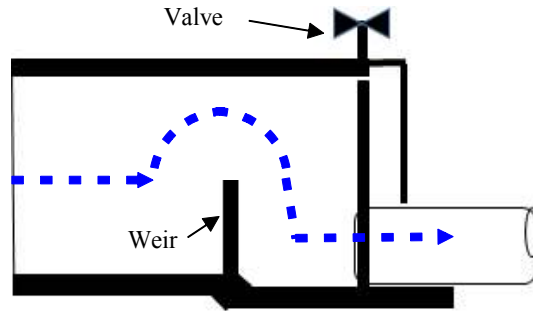


Fig. 2. Cross-section view of distribution basin.

수조에 분배 파이프가 연결되어 있거나 월류 웨어가 설치되어 있는 경우가 대부분이다. 따라서 분배되는 공정 수, 분배조 형태, 분배조 이후 파이프나 수로의 형태 구조 등에 의해 분배량의 편차가 발생하게 된다 (Ramamurthy et al., 1987). 즉 분배조와 가까운 공정일 수록 먼 공정보다 유량이 많이 쏠리는 현상이 발생하며 불균등성이 커지는 것이 일반적이다.

일반적으로 월류 웨어형 분배조는 사각 구조에 일정한 높이의 월류 웨어로 구성된 단순한 구조로 분배조에 대한 규격화된 설계 기준이 없기 때문에 크기, 형태, 구조 등이 설계자의 주관적 판단에 의해 설계된다(Kim et al., 2019). 분배조의 유량 분배에 영향을 미치는 주요 요인은 분배조로 유입되는 유량, 분배조의 형태, 크기 등으로 분배조 내 난류 강도 및 수류의 흐름 등에 영향을 받는다 (Cho and Yoo, 2015). 또한 분배조와 연결되어 있는 관의 경우는 관의 길이, 굴곡에 의한 관내 마찰 손실에 영향을 받는다.

분배조의 균등한 분배는 공정 효율에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 중요하다. 예를 들면 약품 투입 이후 응집지 유입 유량이 불균등하면 플록의 형성과 성장 등에 영향을 줄 뿐만 아니라 침전지의 침전효율에 영향을 미쳐 전체적으로 수질악화의 원인이 되기도 한다. 따라서 분배조의 분배량 균등성을 진단하고 평가하는 것은 수처리 공정 최적화 및 수질향상에 중요한 요인이 된다.

본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)적 기법을 활용하여 부산 S처리장 원수 유입 분배조의 최적화 방안을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 공정

연구대상 시설은 설계용량(452,000 m³/d)규모 하수처리장으로 1단계 처리용량 122,000 m³/일, 표준활성슬러지공법과 처리용량 230,000 m³/일, 2단계 시설로 MLE (Modified Ludzack Ettinger)공법으로 구성되어 있다. 연구 대상 분배조는 2단계 시설 유입 분배조이다. 분배조는 7개 웨어로 구성되어 있고 그 형태는 Fig. 1,2와 같다.

분배조는 1차 침전지로 물량을 균등하게 분배하는 것이 주요 기능이다. 본 연구 대상 분배조는 Fig. 1에서와 같이 반원형의 분배조로 유입 되는 물의 주 흐름이 분배조 전면에서 수직으로 꺾어 웨어 C, D 방향을 향하는 구조로 되어 있다. 따라서 C, D 웨어로 물이 많이 넘어갈 것이 쉽게 추정할 수 있는 상황이며 실제로 정확히 계량되지는 않지만 C, D 웨어로 유량이 많이 분배되고 있는 상황이다.

분배조의 분배량을 개선하기 위해서는 일반적으로 분배조 내에 정류벽과 같은 정류시설 설치를 고려할 수 있으나 본 대상 연구시설처럼 원수 분배조의 경우는 하수처리장 운전을 멈추지 않는 한 운전 중에 시설개선이 이루어져야하기 때문에 가능한 쉬운 개선방법이 선택해야 한다. 따라서 가능한 최소 조건으로 시설개선이 가능한 방법으로 웨어 높이를 조절할 수 있는 가변형 웨어 설치가 가장 최적 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 원수 유입 유량에 따라 각 7개 웨어로 넘어가는 물량을 전산유체해석을 통해 정확히 계산한 다음 각 웨어로 균등하게 넘어가게 하기 위해서 각 웨어의

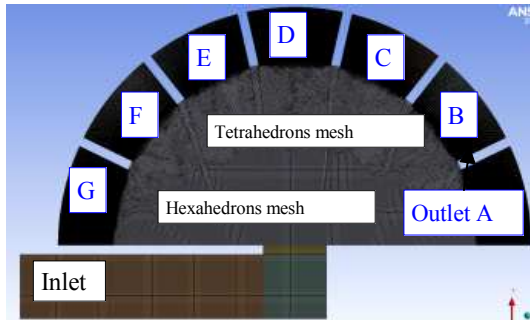


Fig. 3. Computational domain and grids of distribution basin.

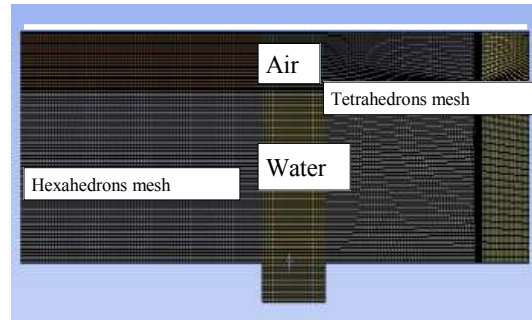


Fig. 4. Water and air domain at Cross-section view of distribution basin.

높이를 얼마나 조정해야 하는 지 그 높이를 산출하고자 한다.

2.2. 전산유체 해석

Fig. 3, 4는 대상 분배조의 유동 해석에 대한 전체해석 영역과 계산 격자를 나타낸 것이다. 격자제는 ANSYS FLUENT MESHING를 이용하여 육면체, 사면체 및 프리즘격자 형태를 혼용하여 생성하였다. 격자 Nodes는 5,373,734개이었고 Elements는 5,072,404개이었다. 물이 넘어가는 웨어 영역은 보다 정확한 계산을 위해 1 cm 격자 Inflation을 방법을 활용하였다.

경계조건은 모든 벽면에 대해 점착조건(no-slip condition)을 적용하고 입구에서는 기준 유량이 유입되고 출구에서는 전압력 0 bar의 대기압 조건을 적용하여 유동해석을 수행하였다. 난류모델은 ANSYS FLUENT21에 지원되는 k-ε Standard 모델에서 사용했고 벽면에서는 Standard Wall Functions를 사용하였다(Leonid and Vitaly, 2013). 분배조 월류벽으로 넘어가는 물량을 정확히 산정하기 위해서 물과 공기 경계면 계산을 위해 Multiphase 모델 중에서 Volume of Fluid 모델을 활용하였고 부피 분율 파라미터는 Implicit를 적용하였다(Menter, 2002). Solution Methods에서 Pressure-Velocity Coupling은 Simple을 적용했고 Spatial Discretization Gradient는 Least Squares Cell based를, Pressure는 PRESTO를 적용했다. Calculation 조건은 Transient 방법으로 Time Step Size는 0.03 sec, Max Iterations/ Time Steps는 20, Number of Time Steps는

1500으로 계산하였다. 계산에 활용한 하드웨어 CPU는 Intel(R) Core(TM) i9-10900X@ 3.7GHz, 256GB RAM으로 수행하였다.

2.3. 최적화 방법

최적화 도구는 기계 학습, 통계 분석 및 공정 개선 도구 모음을 제공하는 Minitab 을 활용하였다. 실험계획법으로 다구찌 방법과 Minitab에서 제공하는 최적화 솔루션을 활용하여 최적화를 수행하였다. 다구찌 방법은 직교배열표를 이용한 실험계획법으로 최적해를 구해 제품 및 공정 설계에서 가장 저렴한 비용으로 안정적이고 신뢰성이 높은 성능을 나타내는 인자의 조합을 찾는다. 또한 실험할 때 실제 사용하는 조건과 똑같이 잡음조건을 바꾸어 가면서 실험하여 최적 조건을 찾는 것이 특징이다(Panda and Singh, 2013). 품질 특성의 목표 값을 유지하면서, 분산을 줄이는 인자에 대해 설정 값을 추출할 수 있다. 따라서 다구찌 방법은 제어 가능하고 영향력이 강한 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하고 제어할 수 없는 잡음의 영향력을 최소로 하는 강건 설계(robust design)를 할 수 있다(Antony, 2000; Ravella et al., 2008).

다구찌 실험 설계에서는 생산자에 의하여 설정되는 요인인 제어요인(Control parameter) 또는 설계요인과 생산자가 제어할 수 없고 사용 환경에 따라 변할 수 있는 요인인 잡음요인(noise parameter)이 있다. 제품이나 공정의 잡음요인(product noise)은 미흡한 공정개선에 의해 발생하는 최종 결과물에 대한 성능 오차 값의 분산도를

Table 1. Taguchi mixed arrangement table(L16(4*2, 2*5))

Item	C	D	A	B	E	F	G	C	D	A	B	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	2	1	1	1	2	2	0	20	0	0	0	20	20
3	1	3	2	2	2	1	1	0	40	20	20	20	0	0
4	1	4	2	2	2	2	2	0	60	20	20	20	20	20
5	2	1	1	2	2	1	2	20	0	0	20	20	0	20
6	2	2	1	2	2	2	1	20	20	0	20	20	20	0
7	2	3	2	1	1	1	2	20	40	20	0	0	0	20
8	2	4	2	1	1	2	1	20	60	20	0	0	20	0
9	3	1	2	1	2	2	1	40	0	20	0	20	20	0
10	3	2	2	1	2	1	2	40	20	20	0	20	0	20
11	3	3	1	2	1	2	1	40	40	0	20	0	20	0
12	3	4	1	2	1	1	2	40	60	0	20	0	0	20
13	4	1	2	2	1	2	2	60	0	20	20	0	20	20
14	4	2	2	2	1	1	1	60	20	20	20	0	0	0
15	4	3	1	1	2	2	2	60	40	0	0	20	20	20
16	4	4	1	1	2	1	1	60	60	0	0	20	0	0

의미하며 따라서 목적 시스템 해석결과 신호인력 값과 산출물 잡음비를 의미하는 S/N비의 값이 클수록 좋은 것으로 해석한다(Canel et al., 2019; Eslami et al., 2019).

본 연구에서는 다구찌 혼합배열표로 L16(4² * 2⁵)을 활용했다(Table 1). 배열표는 4수준의 2요소와 2수준의 5요소를 합하여 총 16회 실험을 실시하는 배열표이다. 4수준 2요소는 본 분배조에서 가장 유량 균등성에 영향을 많이 미치는 C, D 웨어를 선정하였고 상대적으로 영향이 적은 나머지 웨어는 2수준으로 결정하였다. 수준은 웨어 높이를 0, 20 mm, 40 mm, 60mm로 4수준이다.

$$\text{표본 평균 } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\text{표본 분산 } S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\text{망목 특성 SN Ratio } 10 \log(\bar{y}^2 / S_y^2)$$

$$\text{망소 특성 SN Ratio } -10 \log[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2]$$

$$\text{망대 특성 SN Ratio } -10 \log[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i}]$$

Minitab 반응 최적화 도구는 단일 반응 또는 복합 반응의 최적화 변수를 구분하여 여러 변수의 반응에 대한 영향을 평가해야 하는 경우 유용하다. 여러 반응을 최적화하려면 각 반응의 모형이 적합해야 한다. Minitab에서도 다구찌 방법과 마찬가지로 각 반응에 대해 정의한 요구 사항에 따라 망소, 망목, 망대 등의 최적 반응을 평가할 수 있다. Minitab에서 각 반응의 개별 만족도를 계산하고 각 반응에 할당된 중요성을 기준으로 특정 값을 부여한다. 중요도 값에 따라 최적화 결과 값의 민감도가 달라지기 때문에 심중해야 한다. 이 중요도 값을 결합하여 복합 반응 시스템의 종합 또는 전체 만족도를 결정하며 종합 만족도가 최대값에 도달되도록 하는 방식으로 최적화가 진행된다(Michael, 2005).

직교배열, 자료분석 및 분산분석(ANOVA)은 다구찌 기법에 기초한 MINITAB 16 software (Minitab, Inc., State College PA, PA, USA)를 사용하였다(Heathcote, 2016).

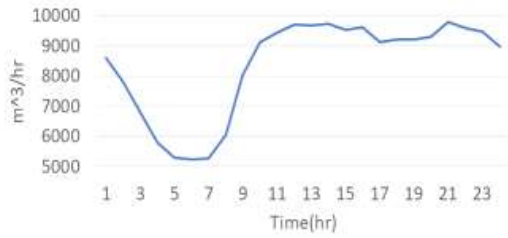


Fig. 5. Inflow per hour by hourly, Q1 2020.



Fig. 6. View of water flowing over weir.

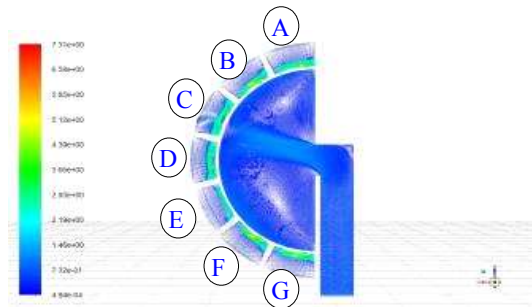


Fig. 7. Velocity profile within the distribution basin.

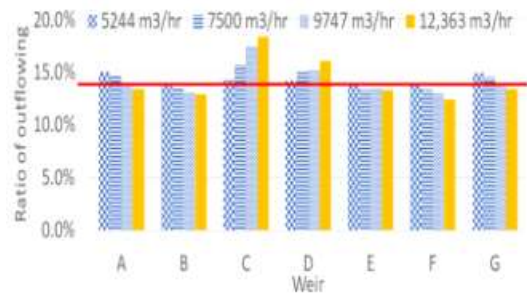


Fig. 8. Ratio of outflowing over each weir depending on inflow per hour.

Table 2. Relative ratio of flowing over each weir depending on inflow per hour

Unit : %

Weir	Flow	5,244 m ³ /hr	7,500 m ³ /hr	9,747 m ³ /hr	12,363 m ³ /hr
	A		105	102	97
B		98	94	92	91
C		100	110	122	129
D		99	106	107	113
E		97	93	95	93
F		96	93	91	87
G		104	102	97	94

3. 결과 및 고찰

3.1. 웨어 월류량 계산

분배조에서 분배량은 유입 유량에 따라 달라질 수 있기 때문에 유입 유량을 선정하였다. 기준 유량 자료는 대상 처리장 2020년 1분기 시간별 유량 부하를 참고했다 (Fig. 5). 전산유체해석에 활용한 유량은 최대 9,746 m³/hr, 최소 5,244 m³/hr, 평균 7,500 m³/hr, 우천시는

12,363 m³/hr를 기준으로 계산하였다.

Fig. 6은 분배조 웨어에서 물이 넘어가는 전산유체해석 결과 그림이다. Fig. 7은 분배조 내 유동상태를 나타내는 속도 분포로 웨어 C, D로 속도가 빠름을 알 수 있다. Fig. 8은 7개 웨어로 분배되는 월류 유량을 계산한 결과 그래프이다. 그래프에서와 같이 유입 유량이 증가할수록 C, D 웨어로 월류량이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Table 3. CFD calculation result by Taguchi mixed arrangement table

Item	C	D	A	B	E	F	G	SN	S.D.
1	471	411	374	353	365	351	374	19.2	42.4
2	485	361	420	380	379	320	356	17.2	53.0
3	493	322	375	336	335	397	442	15.7	63.1
4	528	283	401	361	361	363	403	14.3	74.4
5	415	443	433	329	328	388	364	18.2	47.3
6	422	382	443	337	336	337	443	17.7	50.1
7	423	322	377	401	400	400	376	21.6	32.1
8	427	270	385	409	408	346	454	16.0	61.0
9	350	453	377	401	338	337	444	18.0	48.4
10	360	394	388	412	349	410	386	24.2	23.7
11	357	329	455	348	410	346	454	17.2	53.3
12	367	279	466	357	419	418	394	16.2	59.5
13	301	475	399	358	420	354	393	16.8	55.5
14	290	399	390	350	411	407	453	17.4	52.0
15	317	342	475	429	365	366	406	17.0	54.2
16	303	277	464	419	355	418	464	14.2	75.2

Table 4. Flow sensitivity by each weir

Item	C	D	A	B	E	F	G
1	16.6	18.1	17.1	18.4	17.7	18.4	16.9
2	18.4	19.2	18.0	16.7	17.4	16.8	18.2
3	18.9	17.9					
4	16.4	15.2					
Delta	2.55	3.96	0.89	1.74	0.28	1.55	1.28
Ranking	2	1	6	3	7	4	5

웨어 C, D로 월류량이 많은 이유는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 유입되는 하수의 진로가 C, D 웨어로 집중되기 때문이다. 즉 유입된 하수가 분배조 입구에서 직각으로 방향이 바뀌면서 C, D 웨어로 향하기 때문에 이는 당연한 결과이다. Table 2는 이상적인 7개 웨어 분배량인 14.29%를 100% 하여 각 웨어 별로 상대적인 편차를 나타낸 표이다.

유량의 변화에 따른 분배량의 패턴은 유입 유량이 적은 경우에는 A, G 등 양쪽 가장 자리로 유량 분배량이 많았고 유량이 증가할수록 웨어 C, D로 쓸림 현상이 강해짐을 알 수 있었다. 일일 최대유량에서 웨어 C는 다른 웨어 분배량에 비해 상대적으로 약 22%까지 분배량이 증

가하였다.

3.2. 다구찌 최적화

Table 3은 다구찌 직교배열표에 따라 16회 전산유체 해석을 한 결과 각 웨어 유량이다. 각 실험 조건에 따라 7개 웨어로 넘어가는 물량의 다르지만 전체 유입 유량이 각 웨어로 넘어가므로 각 실험별 평균값은 동일하다. 다만 각 웨어로 넘어가는 월류량이 다르기 때문에 그 편차 즉 표준편차가 다르고 이에 따라 신호대 잡음비인 SN비가 다르며 SN비는 클수록 좋은 결과이다. 왜냐하면 SN비는 평균을 표준편차로 나눈 값이므로 표준편차가 작을수록 SN비는 커지기 때문이다.

Table 4는 신호대 잡음비에 대한 반응을 나타낸 표로

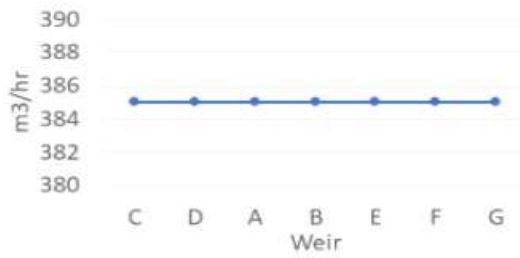


Fig. 9. Plot of main Effects by Mean.

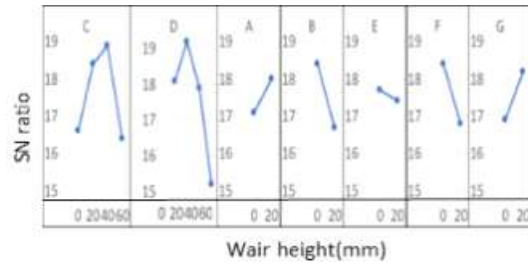


Fig. 10. Plot of main effect by signal to noise ratio.

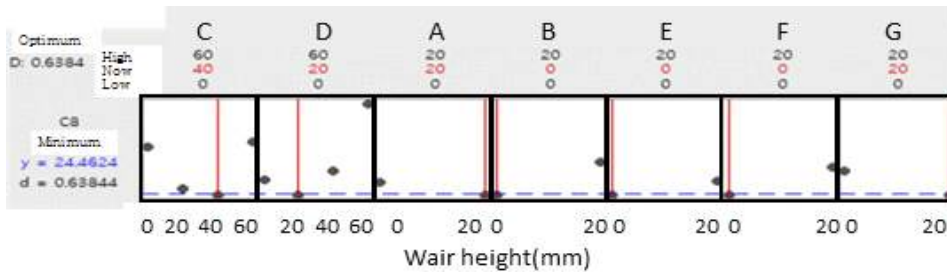


Fig. 11. Optimized value by minitab calculation.

Table 5. Optimization result by minitab calculation

Variable	C	D	A	B	E	F	G	Fitness
Solution	40	20	20	0	0	0	20	0.895

각 웨어 수준별 망목 즉 특정 목표 값에 대한 특성을 나타낸 값으로 최종적으로 델타 값이 큰 순으로 영향 정도가 크다는 것을 의미한다. 웨어 중에서 가장 영향이 큰 웨어는 델타 값이 3.96 가장 큰 D 웨어이고 다음은 C 웨어이다. 값을 비교해 보면 C, D 웨어가 주도적인 영향인자이고 다른 웨어는 상대적으로 영향 정도가 적을 것을 알 수 있다. 영향 정도는 B, F, G, A, E 순이다.

Fig. 9는 전체 웨어로 넘어가는 월류량의 평균값이 같다는 것을 나타내고 있다. 즉 들어온 물이 각 웨어로 모두 넘어가는 현상이므로 당연한 결과이다. Fig. 10은 Table 4를 그림으로 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 신호대 잡음비는 웨어 D가 상대적으로 변화폭이 가장 크고 다음은 C 웨어이다. C, D 웨어는 높이 변화가 4수준이고 나머지 웨어는 2수준이다. 2수준 웨어의 신호대 잡음비 변화폭은 B, F, G, E 순이었다. 이와 같이 신호대 잡음비는 웨어 높이에 따른 월류량의 변화폭이며 월류량

의 민감도를 의미하기도 한다.

3.3. Minitab 최적화

Minitab 분석 도구를 활용하면 설계인자에 대한 반응을 최적화할 수 있다. 반응최적화는 일반선형모델에서 설계인자에 대한 반응값의 최대값, 최소값, 목표값을 선정하여 설계인자의 최적값을 찾을 수 있다(Ardakani et al., 2012; Heathcote et al., 2018). Minitab 최적화 결과 Table 5와 같이 각 웨어별로 최적 웨어 높이를 산출하였고 Fig. 11은 이를 그림으로 나타낸 것이다. 각각의 웨어 높이에서 유출되는 월류량의 편차가 최소가 되는 실험 점이 최적화 결과값으로 나타나 있고 이 최적 높이에서 각 웨어 월류량의 균등성이 가장 양호하다는 것을 의미한다.

3.4. 최적화 평가

본 연구 대상인 하수처리장 분배조의 경우 Minitab

Table 6. Comparison of optimization result by Taguchi and Minitab method

Method	Item	C	D	A	B	E	F	G	S.D
Taguchi	Weir(mm)	40	20	20	0	20	0	20	
	Flow(l/s)	360	394	388	412	349	410	386	23.7
	Ratio(%)	0.95	1.04	1.03	1.09	0.92	1.09	1.02	
Minitab	Weir(mm)	40	20	20	0	0	0	20	
	Flow(l/s)	355	389	379	402	400	399	376	17.1
	Ratio(%)	0.92	1.01	0.98	1.04	1.04	1.04	0.98	

그리고 다구찌 최적화 두 가지 방법 모두 유효한 결과를 얻을 수 있었다. Minitab 분석 도구를 활용한 최적화 결과와 다구찌 최적화 결과값을 비교하면 Table 6과 같이 정리할 수 있다. 다구찌 방법은 최대 9%, 표준편차 23.7인 반면 Minitab 방법은 최대 8%이고 표준편차 17.14로 약간 개선된 결과를 보였다.

4. 결론

하수처리장 반원형 유량 분배조는 유입유량이 적으면 양쪽 끝단 웨어 쪽으로 월류 유량이 많고 유입유량이 증가할수록 중간 웨어 쪽으로 월류유량이 증가하며 또한 유량이 집중되는 중간 웨어가 전체 유량 균등성에 가장 큰 영향을 준다. 웨어 불균등성은 전산유체해석 결과 유입유량이 최소일 때는 5%, 평균일 때는 10%, 최대일 때는 22%까지 편차가 발생하였다. 다구찌 혼합배열 표 (L16(4×2, 2×5))을 활용한 최적화 결과 7개 웨어의 적정 높이는 각각 40 mm, 20 mm, 20 mm, 0, 20 mm, 0, 20 mm이었고 이때 분배량의 최대 편차는 9%, 표준편차는 23.7이었다. Minitab 최적화 도구를 활용한 7개 웨어의 적정 높이는 각각 40 mm, 20 mm, 20 mm, 0, 0, 0, 20 mm이었고 이때 분배량의 최대 편차는 8%, 표준편차는 17.14로 다구찌 방법보다 약간 개선되었다.

REFERENCE

- Antony, J., 2000, Multi-response optimization in industrial experiments using Taguchi's quality loss function and principal component analysis, *Quality and Reliability Engineering International*, 16, 3-8.
- Ardakani, M. K., Wulff, S. S., 2012, An Overview of optimization formulations for multiresponse surface problems, *Quality and Reliability Engineering International*, 29, 3-16.
- Canel, T., Zeren, M., Smmazcelik, T., 2019, Laser parameters optimization of surface treating of Al 6082-T6 with Taguchi method, *Optics and Laser Technology*, 120, 105714.
- Cho, Y. M., Yoo, P. J., 2015, Optimization of distribution basin and ratio at valve opening in the water treatment process, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 29, 559-565.
- Eslami, N., Hischer, Y., Harms, A., Lauterbach, D., Bohm, S., 2019, Optimization of process parameters for friction Stir welding of aluminum and copper using the Taguchi method, *Metals*, 9.
- Heathcote, D. J., Gursul, I., Cleaver, D. J., 2016, An Experimental study of mini-tabs for aerodynamic load control, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, IAA Paper, 2016-0325.
- Heathcote, D. J., Gursul, I., Cleaver, D. J., 2018, Aerodynamic load alleviation using minitabs, *J. of AIRCRAFT* 55, 2068-2077.
- Kim, T. K., Han, H. S., Choi, Y. J., 2019, Analysis of flow distribution and void fraction in distribution basin using CFD, *Kor. Soc. of Envi. Health and Toxi.*, 10, 124.
- Leonid, G., Vitaly, H., 2013, Turbulence modeling applied to flow over a hydraulic ball check valve, *Eng.*, 5, 685-691.
- Menter, F. R., 2002, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA J.*, 40, 254-266.
- Michael, R. D., Steven, O, 2005, Discovering influential cases in linear regression with Minitab: Peeking into multidimensions with a Mintab macro, *Statistical Methodology*, 2, 71-81.
- Panda, A., Singh, R. K., 2013, Optimization of process parameters in the catalytic degradation of polypropylene

- to liquid fuel by Taguchi method, Adv. Chem. Eng. Res. ACER, 2, 106-112.
- Ramamurthy, A. S., Tim, U. S., Rao, M. V. J., 1987, Weir orifice units for uniform flow distribution, J. Env. Eng., 113, 155-166.
- Rao, R. S., Kumar, C. G., Prakasham, R. S., Hobbs, P. J., 2008, The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications, A critical appraisal Bio. J., 3, 510 - 523.

-
- Professor. Yong-Jun Jung
Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan
yjjung@cup.ac.kr
 - Director. Hae-Sik Park
Busan Environmental Corporation
hspark@beco.go.kr
 - Researcher. Young-Man Cho
Busan Metrocity
cho12211@daum.net