

## 論 文

## 우수거 설계를 위한 인천지방에서의 확률강우강도식의 산정

## Determination of Probable Rainfall Intensity Formulas for Designing Storm Sewer Systems at Incheon District

안태진\* · 김경섭\*\*

Ahn, Tae-Jin\* · Kim, Kyung-Sub\*\*

## Abstract

This paper presents a procedure for determining the design rainfall depth and the design rainfall intensity at Incheon city area in Korea. In this study the eight probability distributions are considered to estimate the probable rainfall depths for 11 different durations. The Kolmogorov - Smirnov test and the Chi-square test are adopted to test each distribution. The probable rainfall intensity formulas are then determined by i) the least squares (LS) method, ii) the least median squares (LMS) method, iii) the reweighted least squares method based on the LMS (RLS), and iv) the constrained regression (CR) model. The Talbot, the Sherman, the Japanese, and the Unified type are considered to determine the best type for the Incheon station. The root mean squared (RMS) errors are computed to test the formulas derived by four methods. It is found that the Unified type is the most reliable and that all methods presented herein are acceptable for determining the coefficients of rainfall intensity formulas from an engineering point of view.

## 1. 서 론

일반적으로 도시화가 진행되어 감에 따라 유역내 불투수성 면적이 증가하고 저류용량이 감소하므로 침투유량 및 유출용적이 증가한다. 도시 미계측유역에서의 우수구 설계시 설계홍수량을 추정함에 있어서 주로 영향을 미치는

설계강우강도의 결정은 가장 기본적인 사항이다. 또한 확률강우량 산정을 위한 최적확률분포형의 선정은 매우 중요하고 어려운 과제이며, 제안된 확률분포형을 적용할 때는 자료의 정상성을 나타낼 수 있는 만큼 충분한 장기 관측강우량으로부터 각 분포의 적합성 검정을 실시하여 적용성 여부를 결정하여야 한다. 본 연구에서 채택한 확률분포형은 정규분포를 포함한 8개 확률분포형이며 적합도 검정을 통하여 최적확률분포형을 결정하였다.

일반적으로 우리나라에서 적용하고 있는 강

\* 안성산업대학교 토목공학과 전임강사

\*\*안성산업대학교 환경공학과 조교수

우강도공식은 Talbot형, Sherman형 및 Japanese형이다. 각 강우관측소의 강우특성을 나타내는 상수는 최소자승법 (least squares method, LS)으로 결정하고 있으며 각 강우관측소에 관한 연구논문은 다수 발표되었다. Lee와 Park(1992) 1)은 서울지방에서 최소자승법으로 구한 통합형과 위의 3가지 유형을 비교하였다. 한편 Wenzel(1982) 6)은 이러한 강우강도형의 이론적인 근거는 없으며 다만 회귀분석에 의하여 최적곡선을 나타내는 상수를 결정하는 것이라 하였다.

Rousseuw and Leory(1987) 5)는 자료의 극치(extreme data)를 과대평가하지 않는 최소중간치자승법 (least median squares method, LMS)을 해석하는 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 강우강도식의 상수는 최소자승법을 적용하여 구하였으나 본 연구에서는 최소중간치자승법, LMS를 근본으로한 재가중최소자승법 (reweighted linear squares method, RLS) 및 선형제약회귀모형 (constrained regression model, CR)을 추가로 적용하여 인천지방에 가장 적합한 강우강도식의 결정과 회귀방법의 적용성을 평가코자 한다.

## 2. 확률강우량의 추정

도시내 우수거 및 배수구조물 설계시 설계강우지속기간을 나타내는 도달시간(time of concentration)은 수시간 이내이다. 따라서 본 연구에서는 인천강우관측소에서 1952년부터 1996년까지 강우지속기간 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분, 90분, 120분, 180분, 240분 및 360분별 연최대강우량을 이용하여 각 지속기간별 최적분포형을 결정하고, 빈도해석에 의하여 확률강우량을 추정하였다. 채택한 분포는 정규분포, 2변수 대수정규분포, 3변수 대수정규분포, Type I 극치분포, Pearson type III 분포, log-Pearson type III 분포, Gumbel-Chow 분포, 및 Iwai 분포이며 각 분포의 매개변수는 모멘트법과 최우법으로 계산하고 그 적합성을 검토하였다. 분포의 적합도 검정은 Kolmogorov-Smirnov (K-S)검정법과 Chi-square ( $\chi^2$  test) 검정법을 채택하였다. 2, 3) Table 1은 지속기간별 확률강우량과 최적분포형을 보여주고 있으며 지속기간 10분, 20분, 30분, 40분, 60분, 90분 및 120분은 Pearson

표 1. 강우지속기간별 확률강우량

Return Period in years	Rainfall for Duration(mm)										
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min	360 min
5	17.6	27.9	36.0	42.7	47.3	53.5	66.6	77.8	92.2	102.8	118.5
10	19.9	32.5	42.1	50.3	56.3	64.2	79.6	94.1	109.5	122.4	144.0
20	21.9	36.7	47.8	57.6	65.4	74.5	91.9	109.7	126.1	141.4	170.8
30	22.9	39.1	51.0	61.7	70.9	80.4	99.0	118.6	135.6	152.5	187.2
50	24.3	41.9	54.9	66.7	77.8	87.9	107.8	129.8	147.6	166.6	208.8
80	25.4	44.6	58.5	71.3	84.4	94.7	115.7	139.9	158.5	179.6	229.8
100	25.9	45.8	60.2	73.4	87.6	97.9	119.5	144.7	163.7	185.8	240.2
150	26.9	47.9	63.2	77.3	93.5	103.7	126.3	153.4	173.0	197.3	259.7
200	27.6	49.5	65.3	80.0	97.8	107.9	131.0	159.5	179.7	205.5	274.1
selected distribu- tion	Pearson type III	Pearson type III	Pearson type III	Pearson type III	Iwai	Pearson type III	Pearson type III	Pearson type III	Gumbel- Chow	Iwai	log- Pearson type III

type III 분포가, 50분과 240분은 Iwai 분포, 180분은 Gumbel-Chow 분포, 360분은 log-Pearson type III 분포가 적합한 것으로 분석되었다.

### 3. 회귀분석법

강우관측소의 강우특성과 재현기간에 따라 영향을 받는 강우강도와 지속기간의 관계는 다음 식 (1)~(4)와 같은 4가지 유형의 경험공식으로서 표시된다.

$$\text{Talbot 형: } I = \frac{a}{t+b} \quad (1)$$

$$\text{Sherman 형: } I = \frac{a}{t^n} \quad (2)$$

$$\text{Japanese 형: } I = \frac{a}{t^{1/2} + b} \quad (3)$$

$$\text{통합(Unified) 형: } I = \frac{a}{t^n + b} \quad (4)$$

여기서,  $I$ 는 강우강도(mm/hr);  $t$ 는 강우지속기간(min);  $a$ ,  $b$  및  $n$ 는 회귀분석에 의하여 결정되는 상수이다.

2장에서 추정된 인천지방에서의 강우지속기간별 확률강우량을 이용하여 강우강도식을 결정하기 위하여 최소자승법(LS), 최소중간치자승법(LMS), LMS를 근본으로한 재가중최소자승법(RLS) 및 선형회귀모형(CR)을 적용하였다. 최소자승법은 회귀방정식의 상수를 결정하기 위하여 잔차제곱치의 누계를 최소화하는 방법으로 다음 (5)와 같이 표현된다.

$$\minimize_{b_0, b_1} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5)$$

여기서  $e_i$ 는 잔차로서 관측치  $y_i^{obs}$ 와 계산치

$y_i^{comp}$ 와의 차이이다. 계산치  $y_i^{comp}$ 는 다음과 같은 식으로 표현되며;  $y_i^{comp} = b_0 + b_1x_i$ , 여기서  $b_0$ 와  $b_1$ 는 상수이고  $x_i$ 는 독립변수이다.

최소중간치자승법(LMS)은 식 (6)과 같이 잔차제곱의 중간치를 최소화하는 방법으로 자료의 극치를 과대평가하지 않는 robust 방법으로 평가되고 있다(Rousseeuw, 1984).<sup>4)</sup>

$$\minimize_{b_0, b_1} \text{median}_{i=1, \dots, n} e_i^2 \quad (6)$$

재가중최소자승법은 최소자승법에 LMS 절대잔차의 함수로 계산되는 가중치  $w_i$ 를 포함하고 있으며 다음 식 (7)과 같다(Rousseeuw and Leroy, 1987).<sup>5)</sup>

$$\minimize_{b_0, b_1} \sum_{i=1}^n w_i e_i^2 \quad (7)$$

여기서 가중치는 이진변수(binary)이며 LMS 절대잔차의 값에 따라 결정된다.

선형계획(linear programming, LP)은 제약조건식 아래에서 목적함수를 최소 또는 최대화하는 수학적모형이다. 선형제약회귀모형(constrained regression, CR)인 모형 1(LP-M1)은 절대잔차의 누계를 최소화하는 모형이다. 모형 1에서 양수값의 편차 또는 음수값의 편차(positive or negative deviation)를 허용하기 위하여 비음수성 변수(nonnegative variables)인  $e_i^+$ 와  $e_i^-$ 를 도입하면  $|e_i|$ 는  $e_i^+$ 이 된다. 여기서  $e_i^+$ 는 절대잔차의 양수부분을,  $e_i^-$ 는 음수부분을 의미한다. 선형계획 모형에서  $e_i^+$ 와  $e_i^-$ 중에서 하나가 양수이면 다른 하나는 0으로 처리된다. 따라서  $e_i^+$ 가 양수이고  $e_i^-$ 가 0이면 잔차는 양수이고,  $e_i^+$ 가 0이고  $e_i^-$ 가 양수이면 잔차는 음수이다. 따라서 모형 1에 두 개의 비음수성 변수를 도입하면 모형 2로 재정립되어 선형계획 프로그램에 의하여 해석될 수 있다.

**모형 1 (LP-M1)**

$$\begin{aligned} \text{min. } z &= \sum_{i=1}^n |e_i| \\ \text{s.t. } y_i^{\text{comp}} - e_i &= y_i^{\text{obs}} \\ e_i &\geq 0 \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

**모형 2 (LP-M)**

$$\text{min. } z = \sum_{i=1}^n e_i^+ + e_i^-$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } y_i^{\text{comp}} + e_i^+ - e_i^- &= y_i^{\text{obs}} \\ e_i^+, e_i^- &\geq 0 \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

**4. 회귀분석법의 적용**

먼저 선형회귀분석법인 LS법, LMS법 및 RLS법을 적용하여 인천지방 확률강우강도식을 Talbot형, Sherman형 및 Japanese형으로 추정하였다. 적용한 방법은 모두 선형회귀법이므로 비선형인 각 유형을 선형으로 변환하였다. LS법을 해석하기 위한 프로그램은 Fortran 언어로 작성하였으며, LMS법과 RLS법은 Rousseeuw와 Leroy(1987)<sup>5)</sup>가 개발한 프로그램 PROGRESS를 이용하였다. 추정된 각 유형의

표 2. 확률강우강도식과 RMS오차(Talbot 형)

Return Period in years	Rainfall Intensity Formulas			RMS errors(mm/hr)		
	LS	LMS	RLS	LS	LMS	RLS
5	$\frac{9090.9}{t+98.8}$	$\frac{9090.9}{t+112.8}$	$\frac{9090.9}{t+108.0}$	7.5	11.0	9.7
10	$\frac{11111.0}{t+104.2}$	$\frac{11111.0}{t+113.2}$	$\frac{10000.0}{t+95.6}$	7.5	10.0	8.3
20	$\frac{12500.0}{t+104.5}$	$\frac{12500.0}{t+106.1}$	$\frac{12500.0}{t+101.0}$	7.5	8.1	6.5
30	$\frac{14285.7}{t+112.9}$	$\frac{12500}{t+96.3}$	$\frac{12500}{t+94.4}$	7.5	6.9	6.1
50	$\frac{16666.7}{t+123.5}$	$\frac{14285.7}{t+101.3}$	$\frac{14285.7}{t+97.0}$	7.7	5.9	4.7
80	$\frac{16666.7}{t+117.2}$	$\frac{14285.7}{t+94.3}$	$\frac{14285.7}{t+91.3}$	7.8	5.9	4.5
100	$\frac{16666.7}{t+114.5}$	$\frac{16666.7}{t+107.0}$	$\frac{14285.7}{t+88.8}$	8.2	5.2	4.9
150	$\frac{20000.0}{t+132.0}$	$\frac{16666.7}{t+101.6}$	$\frac{16666.7}{t+99.0}$	7.9	4.9	4.0
200	$\frac{20000.0}{t+128.0}$	$\frac{16666.7}{t+94.0}$	$\frac{16666.7}{t+95.8}$	8.3	3.8	4.3

표 2b. 확률강우강도식과 RMS오차 (Sherman 형)

Return Period in years	Rainfall Intensity Formulas			RMS errors(mm/hr)		
	LS	LMS	RLS	LS	LMS	RLS
5	$345.1t^{-0.4677}$	$326.2t^{-0.4422}$	$334.69t^{-0.4526}$	4.0	3.9	4.0
10	$382.0t^{-0.4517}$	$369.4t^{-0.4307}$	$337.9t^{-0.4100}$	5.3	5.9	4.6
20	$411.7t^{-0.4364}$	$396.8t^{-0.4131}$	$412.8t^{-0.4277}$	6.7	7.4	7.4
30	$426.5t^{-0.4276}$	$385.4t^{-0.3912}$	$376.1t^{-0.3832}$	7.4	6.7	6.7
50	$443.7t^{-0.4171}$	$437.2t^{-0.3983}$	$459.4t^{-0.4157}$	10.6	5.4	5.6
80	$456.6t^{-0.4072}$	$745.1t^{-0.5083}$	$622.7t^{-0.4712}$	9.3	25.8	18.6
100	$462.6t^{-0.4026}$	$294.7t^{-0.2645}$	$343.1t^{-0.3148}$	9.7	12.3	8.3
150	$472.6t^{-0.3944}$	$278.4t^{-0.2323}$	$349.4t^{-0.3055}$	10.5	15.6	9.1
200	$479.1t^{-0.3887}$	$270.7t^{-0.2144}$	$353.8t^{-0.2991}$	11.0	17.7	9.7

표 2c. 확률강우강도식과 RMS오차 (Japanese 형)

Return Period in years	Rainfall Intensity Formulas			RMS errors(mm/hr)		
	LS	LMS	RLS	LS	LMS	RLS
5	$\frac{392.2}{t^{1/2} - 0.16}$	$\frac{471.7}{t^{1/2} + 1.09}$	$\frac{476.2}{t^{1/2} + 1.21}$	7.9	2.2	1.8
10	$\frac{478.5}{t^{1/2} + 0.08}$	$\frac{574.7}{t^{1/2} + 1.36}$	$\frac{598.8}{t^{1/2} + 1.69}$	9.1	3.0	2.5
20	$\frac{571.4}{t^{1/2} + 0.35}$	$\frac{699.3}{t^{1/2} + 1.86}$	$\frac{719.4}{t^{1/2} + 2.12}$	10.0	3.5	3.2
30	$\frac{625.0}{t + 112.9}$	$\frac{862.1}{t^{1/2} + 2.99}$	$\frac{793.7}{t^{1/2} + 2.36}$	10.2	4.4	3.6
50	$\frac{699.3}{t^{1/2} + 0.76}$	$\frac{990.1}{t^{1/2} + 3.52}$	$\frac{999.9}{t^{1/2} + 3.60}$	10.6	5.4	5.6
80	$\frac{769.2}{t^{1/2} + 0.98}$	$\frac{1123.5}{t^{1/2} + 4.07}$	$\frac{1123.5}{t^{1/2} + 4.13}$	10.8	6.5	6.4
100	$\frac{806.5}{t^{1/2} + 1.09}$	$\frac{1265.8}{t^{1/2} + 4.96}$	$\frac{1190.5}{t^{1/2} + 4.41}$	10.9	8.2	6.9
150	$\frac{877.2}{t^{1/2} + 1.31}$	$\frac{1315.8}{t^{1/2} + 4.82}$	$\frac{1333.3}{t^{1/2} + 4.99}$	11.3	8.1	8.3
200	$\frac{925.9}{t^{1/2} + 1.48}$	$\frac{1449.3}{t^{1/2} + 5.46}$	$\frac{1428.6}{t^{1/2} + 5.3}$	11.3	9.5	8.9

강우강도식과 회귀분석법의 적용성을 평가하기 위하여 평균제곱근오차 (root mean squared errors, RMS)을 계산하였다. Table 2a, Table 2b 및 Table 2c는 각 유형별과 재현기간별 강우강도식과 평균제곱근오차를 나타내었다. Talbot형 은 재현기간이 길수록 오차가 줄어들고, Sherman형과 Japanese형은 재현기간이 길수록 오차가 증가하는 경향을 보이고 있다. 3가지 유형에서는 Japanese형이, 회귀분석법으로는 RLS법이 가장 적합함을 보여주고 있다.

표 3. 확률강우강도식과 RMS오차(Unified 형)

( ) : RMS errors in mm/hr

Return Period in years	Rainfall Intensity Formulas			
	LS	LMS	RLS	LP-M1
5	1306.9 $t^{.689} + 7.51$ (0.83)	1282.0 $t^{.689} + 7.33$ (0.82)	1282.0 $t^{.689} + 7.41$ (0.92)	1326.3 $t^{.689} + 7.94$ (0.95)
10	1831.7 $t^{.711} + 10.26$ (0.86)	1818.2 $t^{.711} + 10.24$ (0.86)	1831.7 $t^{.711} + 10.26$ (0.86)	1821.5 $t^{.711} + 10.20$ (0.84)
20	2380.9 $t^{.726} + 12.88$ (0.88)	2325.6 $t^{.726} + 12.43$ (1.13)	2325.6 $t^{.726} + 12.47$ (1.17)	2409.6 $t^{.726} + 13.10$ (0.88)
30	2702.7 $t^{.732} + 14.29$ (1.05)	2631.6 $t^{.732} + 13.66$ (1.36)	2631.6 $t^{.732} + 13.53$ (1.36)	2732.2 $t^{.732} + 14.46$ (0.94)
50	3225.8 $t^{.739} + 16.61$ (1.23)	3030.3 $t^{.739} + 15.09$ (1.79)	3225.8 $t^{.739} + 15.84$ (2.98)	3184.7 $t^{.739} + 16.39$ (1.22)
80	3571.4 $t^{.742} + 17.89$ (1.71)	3703.7 $t^{.742} + 18.59$ (1.87)	3703.7 $t^{.742} + 18.85$ (1.76)	3571.4 $t^{.742} + 17.89$ (1.71)
100	3846.2 $t^{.744} + 19.04$ (1.86)	4000.0 $t^{.744} + 19.86$ (2.54)	4000.0 $t^{.744} + 20.16$ (2.23)	3759.4 $t^{.744} + 18.58$ (2.03)
150	4166.7 $t^{.745} + 20.16$ (2.42)	4347.8 $t^{.745} + 21.52$ (2.66)	4347.8 $t^{.745} + 21.6$ (2.71)	4132.2 $t^{.745} + 19.99$ (2.50)
200	4347.8 $t^{.746} + 20.69$ (3.11)	4761.9 $t^{.746} + 23.43$ (3.42)	4761.9 $t^{.746} + 23.38$ (3.42)	4273.5 $t^{.746} + 19.94$ (2.98)

표 4. 재현기간별 최적강우강도식과 60분 지속기간 강우강도와 절대잔차

Return period in years	Selected formula	Observed value mm/hr	Estimated value mm/hr	Absolute residual mm/hr
5	$\frac{1282.0}{t^{.689} + 7.33}$ LMS	53.5	53.1	0.4
10	$\frac{1821.5}{t^{.711} + 10.20}$ LP-M1	64.2	63.7	0.5
20	$\frac{2380.9}{t^{.726} + 12.88}$ , LS	74.5	73.4	1.1
30	$\frac{2732.2}{t^{.732} + 14.46}$ , LP-M1	80.4	79.2	1.2
50	$\frac{3184.7}{t^{.739} + 16.39}$ , LP-M1	87.9	86.1	1.8
80	$\frac{3571.4}{t^{.742} + 17.89}$ , LS	94.7	92.2	2.5
100	$\frac{3846.2}{t^{.744} + 19.04}$ , LS	97.9	96.0	1.9
150	$\frac{4166.7}{t^{.745} + 20.16}$ , LS	103.7	100.9	2.8
200	$\frac{4273.5}{t^{.746} + 19.94}$ , LS	107.9	103.9	4.0

LS법, LMS법, RLS법 및 CR 모형을 적용하여 강우강도식을 식 (4)와 같이 표현된 통합형으로 추정하였으며, CR모형은 선형계획 해석 프로그램인 LINDO를 이용하였다. 먼저 시산법과 함께 LS법을 이용하여 통합형의 상수를 결정하고, 결정된 상수  $n$ 값을 고정하여 LMS법, RLS법 및 CR모형으로 나머지 상수를 추정하였다. Table 3은 재현기간별 통합형 강우강도식과 평균제곱근오차를 나타내었으며 통합형 강우강도식의 오차는 위의 3가지 형의 오차보다 현저

히 감소함을 알 수 있다. Table 4는 각 회귀분석법으로 추정한 재현기간별 최적강우강도식과 60분 지속기간에 관한 확률강우강도와 절대잔차를 보여주고 있으며, 재현기간이 길어 질수록 오차도 함께 증가함을 알 수 있다.

### 5. 요약 및 결론

본 연구는 인천지방에서의 최적강우강도식을 추정하기 위하여 재현기간별 확률강우량을 결

정한 후, i) 최소자승법 (LS), ii) 최소중간치자승법 (LMS), iii) 재가중최소자승법 (RLS) 및 iv) 선형제약회귀모형 (CR) 을 적용하였다. 강우강도식은 Talbot형, Sherman형, Japanese형 및 통합형으로 유도하였으며 결정된 강우강도식을 평가하기 위하여 평균제곱근오차를 계산하였다.

분석결과에 의하면 Talbot형, Sherman형 및 Japanese형의 강우강도식 추정에 있어서 LMS 법과 RLS법이 LS법보다 적용성이 높았으며 3가지 형식 중에서는 Japanese형이 적합하였다. 그러나 여러 잠재곡선을 고려하는 통합형의 최적곡선은 시산법과 함께 하는 LS법으로 찾을 수 있으며, 가장 작은 오차를 수반하는 인천지방의 최적강우강도식임을 알 수 있다. 그러므로 강우강도 형식으로는 통합형이 가장 적합한 공식이었으며 공학적인 견지에서 볼 때, 강우강도식의 상수결정을 위한 본 연구에서의 4개 선형회귀분석법은 모두 적합한 것으로 나타났다. 본 연구에서 추정된 최적강우강도식은 인천지

방 우수거 설계시 적용할 수 있으리라 기대된다.

### 참고문헌

1. Lee, W. H. and Park, S. D.: "A Unification of the probable rainfall Intensity formula at Seoul," J. of KSCE, Vol. 12, No. 4., pp. 135-143, 1992.
2. Kite, G. W.: Frequency and Risk Analyses in Hydrology, WRP, 1980.
3. Ponce, V. M.: Engineering Hydrology, Principle and Practices, Prentice Hall, New Jersey, 1989.
4. Rousseeuw, P.: "Least median of squares regression," J. of Am. Stat. Assoc. Vol. 79, pp. 871-880, 1984.
5. Rousseeuw, P. and Leroy, A. (1987). "Robust Regression and Outlier Detection, Wiley," New York.
6. Wenzel, H. G.: "Rainfall for Urban Stormwater Design, Urban Stormwater Hydrology edited by D. F. Kiber," Water Resource Monograph 7, American Geophysical Union, Washington, D. C., 1982.