

Sprinkler 灌溉에 관한 研究 (Studies on the Sprinkler Irrigation)

閔 丙 燮

Byung Sup Min

< 忠南大學校 農科大學教授 >

I. 序 論

우리나라는 그동안 농정의 중점이 국민의 주식 물인 쌀의 증산에 집중되어 왔으며 따라서 미곡 증산을 위한 농토의 기반조성과 그 환경조건의 개선에 막대한 투자와 사업이 추진되어 왔다. 특히 논에 대한 관개용수원의 개발사업은 전천후농업용수원 개발사업이라는 명목으로 적극 추진함으로써 큰 성과를 올렸으며 멀지 않아 논에 대한 관개시설은 완성단계에 도달할 것이다. 그러나 농업의 근대화와 농민의 소득증대를 위해서는 밭의 고도이용과 자본집약적이고 보다 기술적인 원예작물을 비롯한 각종 특용작물의 확대보급이 요청되며 낙농의 진흥과 농지의 확대를 위한 구릉 경사지의 개발에 의한 초지조성 및 과수원 등의 조성이 요청될 것이다. 그런데 이러한 밭의 개발 이용에 있어 안정성 있는 계획생산을 성취하는 데는 반드시 관개시설이 뒷받침되어야 할 것이므로 앞으로 우리나라에서도 전작물에 대한 관개문제가 크로즈·업 될 것으로 여겨진다.

이 전작물에 대한 관개방법에서 가장 적용범위가 넓고 효과적인 것이 다목적 이용도 가능한 Sprinkler 에 의한 살수관계라는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 그러나 우리나라에서는 아직 이에 대한 이론적, 실지적, 기술적인 시험연구가 별로 실시된 바 없다. 따라서 필자는 Sprinkler 관계의 기초적인 몇가지 사항을 규명코자 이론적인 해석과 아울러 실험을 실시하였다.

물은 Sprinkler 관계에 관한 이론적 또는 실지적인 연구는 외국에서는 상당히 진척되어 있는

技術士(農業部門)

것이 사실이다. 즉 살수되는 물방울의 측정에 관해서는 NIEDER DORFER⁽¹⁾(1932)를 비롯하여 여러사람들에 의하여 분말법(粉末法), 흡수법⁽¹⁸⁾, 흔적법(痕跡法)⁽²²⁾, 응고법⁽²⁵⁾(凝固法), Immersion Cell 법⁽¹⁷⁾, 직접촬영법⁽²⁵⁾, Electronic 법⁽⁶⁾ 등이 개발 보고되고 있으며 한편 Sprinkler 에 의한 살수의 이론적인 고찰에, 관한 시험연구에는 SUGI⁽²³⁾등(1958)의 “枝條架に おける 落下水量分布”를 비롯하여 Woodward, G.O⁽²⁸⁾(1959)의 “Sprinkler Irrigation”. SHIRAI⁽²¹⁾(1959)의 “散水かんがいに おける 損失水量”, SUGI⁽²³⁾(1960)의 “Sprinkler の研究” OKAWA⁽¹⁶⁾등(1962)의 “枝條架内の 液滴の形状について”, INOUE⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾(1962)의 “Stains produced by water drops on sheets of filter paper,” “On drop size distribution in spray emitted by a sprinkler under different conditions,” “On size distribution and evaporation losses from spray drop lets emitted by a sprinkler” OKAMURA⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾(1968)의 “スプリンクラー 散水の理論的考察” 등이 있으며, 우리나라에서는 농촌진흥청, 농공이용연구소⁽¹²⁾(1968)에서 Sprinkler 의 성능 및 구조를 파악하기 위하여 초보적인 시험을 실시한 것이 있을 뿐이다.

본 연구에서는 이들의 연구결과를 참고로하여 시험을 실시하고 그 결과를 고찰 해석하였다.

II. 시험연구의 내용

1. 살수물방울의 입경(粒徑)에 관한 시험

Sprinkler 로 부터의 살수분포상황을 실측을

통하여 파악코저 하는 경우에는 물방울의 지름별 분포를 직접적으로 필요로 하지는 않지만 이를 해석적으로 얻고저 할 때에는 반드시 지름의 조성상황(組成狀況)과 그 분포량을 정량적(定量的)으로 파악하여야 한다.

물방울의 지름을 측정하는 방법은 대단히 많고 연구자의 창의에 따라 각각 독자적인 방법이 채택되고 있다.

본 연구에서는 큰 물방울(지름 2mm 이상)과 작은 물방울로 나누어서 측정하였으며 작은 물방울은 유리판 위에서 확대경으로 관측하는 SHIRAI⁽²¹⁾의 방법을 채용하였으며 큰 물방울은 흡수지로 포획하여 그 평균지름을 구하는 방법으로 하였다. 살포된 물방울의 입경의 조성과 그 수량분포의 관계를 평가 분석함에 있어 INOUE⁽²⁾⁽³⁾는 오차분포의 범칙에 입각한 Mugele & Evance의 "Upper limit function"의 이론을 채용하는 것이 가장 합리적이라고 지적하였고 OKAMURA⁽¹⁹⁾도 이에 동조하고 있는데 본 시험의 결과에 대해서도 이 방법으로 측정의 정도(精度)를 확인하였다.

(1) 재료 및 방법

(ㄱ) Sprinkler의 종류 : 중간압식이며 사용압력 2, 3, 4 kg/cm², 양각(仰角)은, 주노즐은 23°, 부노즐은 17°이며 노즐의 지름은 4.0, 4.9, 5.4 mm의 3종을 사용하였다.

(ㄴ) 지름의 측정법 : 지름 2mm 이하의 것은 얇은 파라핀막으로 덮은 몇장의 유리판(8×11 cm)과 1/20 mm 눈금을한 배율 50의 확대경을 준비하고 유리판위에 떨어진 물방울중에서 20~30개를 임의로 선정하여 신속히 그 지름을 측정하였다.

측정값은 그림-1과 같은 단면형을 갖는것의 지름이니까 물방울을 구형(球形)으로 가정할 때에는 다음과 같은 계산으로 그 참지름을 산정하여야 한다.

여기에서 유리판위의 물방울의 최대지름을 d , 물방울과 유리판과의 접촉각을 θ 라하면 유리판 위부분의 물방울의 부피 V 는 (1)식으로 계산할 수 있다.

$$V = \frac{\pi d^3}{12} (1 + \cos\theta)^2 \left(1 - \frac{\cos\theta}{2}\right) \dots\dots (1)$$

따라서 이것과 부피가 같은 구(球)의 지름 D 는 다음과 같이 된다.

$$D = d^3 \sqrt{\frac{1}{2} (1 + \cos\theta)^2 \left(1 - \frac{\cos\theta}{2}\right)} \dots (2)$$

따라서 θ 를 알면 d 로부터 D 를 구할수 있다.

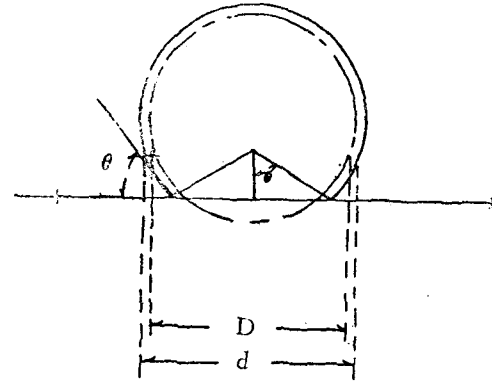


그림-1 유리판의 물방울

SHIRAI 측정한바에 의하면 파라핀 막위의 물방울은 $\cos\theta = 0.56$ 이고 $D \approx 0.81d \dots\dots (3)$ 의 관계를 제시하고 있는데 본 시험에서도 D 의 환산에는 (3)식을 이용하였다.

지름 2mm 이상의 큰물방울은 중력의 영향을 받게되고 유리판위의 물방울의 곡면은 완전한 구면을 유지할 수 없게되니까 (3)식을 적용할수는 없는 것이며 또 물방울이 유리판에 충돌할때에 부서지고 비산하게 되니까 측정의 정도는 크게 저하하게 된다. 따라서 본 시험에서는 큰 물방울은 흡수지로 직접 받아 그 수효를 빨리 헤아린 다음 평량병에 밀봉하여 그 무게를 측정함으로써 물방울의 평균부피와 물방울을 구형으로 가정한 경우의 평균지름을 계산하였다. 이 방법은 받은 물방울의 개개의 지름을 알수는 없으나 측정 위치에서의 평균지름을 구하는에는 쉽고도 정확한 방법이라 할 수 있다.

(2) 결과 및 고찰

① 물방울의 지름과 도달거리간의 관계

노즐의 위치로부터 물방울의 최대도달거리 사이에 있어 2m 간격으로 측정된 각 위치에서의 물방울의 평균지름은 그림-2에서 보는 바와 같이

거리가 증대함에 따라 커지고 가장 먼곳에 가장 큰 지름의 것이 낙하한다는 것이 분명하다.

본 시험에서 얻은 도달거리상에서의 물방울 지름의 분포상황은 거리를 제곱근(平方根) 눈금으로 취하고 지름을 대수눈금으로 취하여 표시하면 그림-2에서 보는 바와 같이 직선적인 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 SHIRAI⁽²¹⁾나 MIZUNOE⁽⁹⁾가 보고한 바와도 일치한다.

Woodward⁽²⁸⁾가 소개한 Frost 의 실험결과에서는 이 양자의 관계가 단순히 지수함수곡선(指數函數曲線)으로 제시되고 있는데 본 실험에서는 단순한 편대수도면(片對數圖面) 상에서는 직선적인 상관성은 거의 인정할수 없으며 또한 이론적인 검토결과에 의한 양자간의 관계에서도 이러한 상관관계는 없다는 것을 알 수 있

는 만큼 Frost 의 실험은 어떤가 결함이 있는 것으로 추정된다.

한편 MIZUNOE⁽⁹⁾ 등은 이들 양자간의 관계를 다음의 실험식으로 표시하고 있는데 본 실험결과도 이 식을 그대로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

$$D = \alpha e^{\beta \sqrt{l}} \dots \dots \dots (4)$$

식에서 D : 물방울의 지름(mm)
 l : 지름 D 인 물방울의 도달거리(m)
 α, β : 실험정수
 α, β 는 노즐의 지름, 압력, Riser의 높이, 분사각 등에 따라 변하는 정수이며 MIZUNOE가 실험한 결과 얻은값과 필자가 얻은 것을 대조하여 표시하면 표-1과 같다.

〈표-1〉 $D \sim l$ 관계의 실험정수(M은 MIZUNOE)

실험자	노즐 지름 (mm)	압력 (kg/cm ²)	2		3		4		5	
			α	β	α	β	α	β	α	β
필 자	4.0		0.208	0.890	0.217	0.773	0.215	0.765	—	—
	4.9		0.201	0.875	0.210	0.805	0.190	0.771	—	—
	5.4		0.203	0.878	0.190	0.807	0.188	0.780	—	—
M	3.9		0.211	0.896	0.218	0.772	—	—	—	—
	4.7		0.195	0.876	0.216	0.810	0.180	0.776	0.210	0.743
	5.5		0.211	0.890	0.193	0.806	—	—	—	—

노즐지름의 차이에 의하여 물방울이 어떻게 달라지는가 하는것을 파악하기 위하여 4.0, 4.9, 5.4mm 노즐에 대한 실험결과를 비교한 것이 그림-3인데 그림에서 보는 바와 같이 확연한 차이를 인정하기 어렵다. 노즐 4.0mm와 5.4mm의 지름의 비는 1.35배인데 그 차이는 겨우 1.4mm에 불과한데 기인하지 않는가 여겨진다. 따라서 물방울의 생성차이를 확인하기 위해서는 중간압식 Sprinkler보다는 노즐지름의 변화범위가 넓은 대형의 고압 Sprinkler를 사용하는것이 적당할 것으로 여겨진다.

② 물방울의 지름과 살수량의 관계

분사방향에 1.0m 간격에 배치한 물을받는 can으로 받은 수량을 노즐로부터 측정 위치까지를 반지름으로 하는 원둘레로 나누면 살수량에 상

당하는 근사적인 살수심을 얻을 수 있다. 이와 같이하여 측정된 살수심 h 는 표-2와 같다.

〈표-2〉 거리별 살수심(mm/hr)

거리 (m)	2	4	6	8	10	12	14	16
살수심 Pr=2 kg/cm ²	0.21	0.70	1.59	2.82	2.80	1.30	0.21	0.10
Pr=3''	0.20	1.21	2.18	2.71	2.62	1.61	0.39	0.11

이 h 를 ①에서 얻은 그림-2의 살수된 물방울의 지름 D 에 대응시켜 표시하면 그림-4와같은 곡선으로 된다. 그림-4는 노즐의 지름 4.9mm, 압력 2.0kg/cm², 3kg/cm²의 것인데 압력이 높아지면 큰 물방울의 양은 감소하고 작은 물방울이 많아지며 최대수량을 나타내는 물방울의 지름은 작아진다는 것을 분명히 알 수 있다.

$D \sim h$ 곡선에 의하여 얻어지는 물방울의 지름

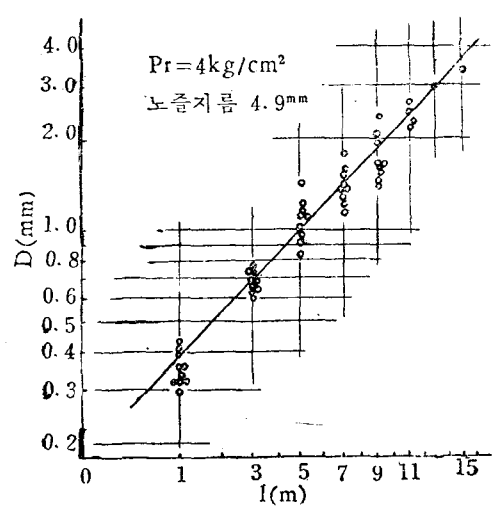
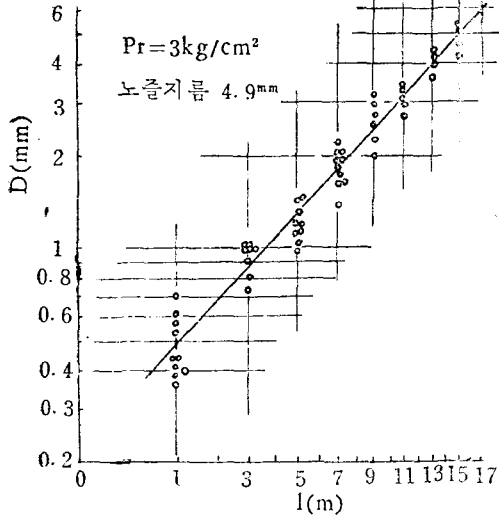
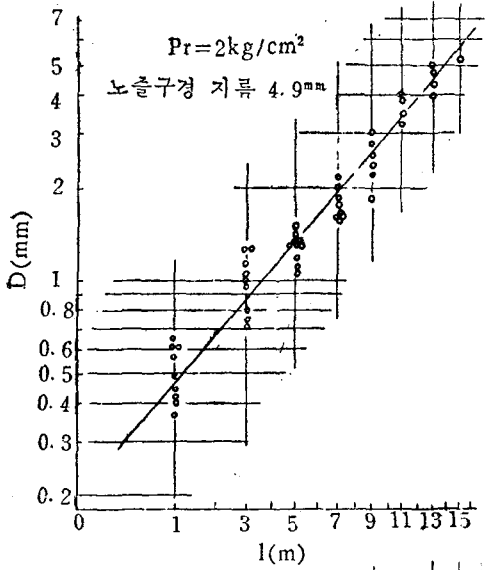


그림-2 물방울의 지름과 도달 거리

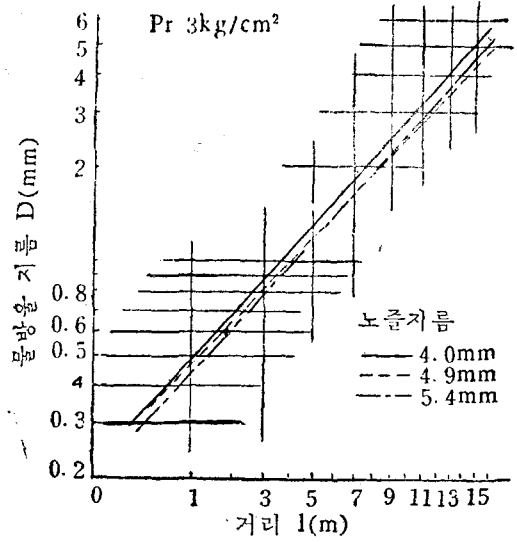


그림-3 노즐별 물방울의 지름과 도달거리

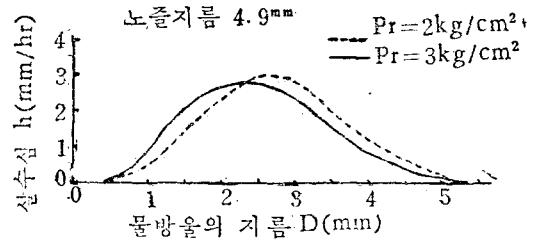


그림-4 물방울의 지름과 살수심의 관계

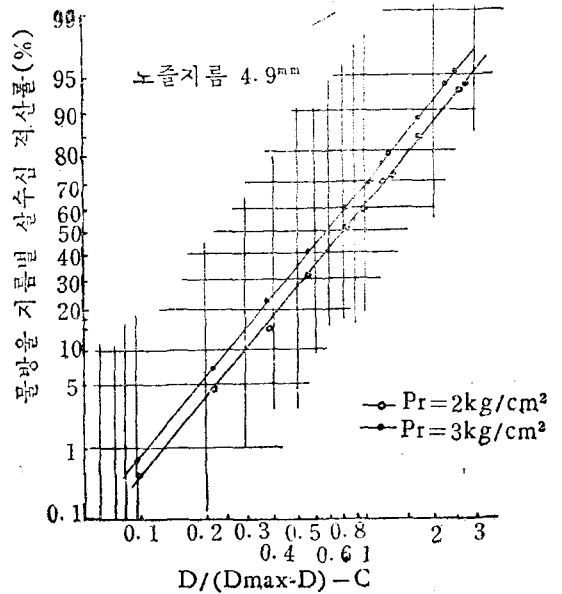


그림-5 상한 해석도

의 계급별 살수심의 적산비율(積算比率)을 Y 축으로 취하고 Dmax 을 최대 물방울지름으로 하였을때의 D/(Dmax-D)를 X 축으로하여 대수확율지에 표시하면 그림-5와 같이 대략 완전한 직선으로 된다.

이와 같이 살수현상에 있어서는 물방울 지름별의 고유수량과 물방울지름의 상한해석값(上限解析値) 사이에는 완전한 정규분포의 관계가 있음을 알 수 있으며 이것이 살수되는 물방울이 갖는 뚜렷한 특성으로 인정되는 바 이점은 MIZU NOE 가 인정하고 있는 바와도 일치한다.

2. 물방울의 운동에 관한 해석(解析)

Sprinkler 의 노즐로부터 방사되는 분사류가 물방울을 형성하는 과정은 당초에는 수류의 연속체였던 것이 진동과 공기의 마찰저항으로 절단되고 차차 세분화 되는 것으로 여겨진다. 그러나 이 현상을 살수되는 분사류의 운동이론으로서 엄밀하게 파악한다는 것은 대단히 복잡한 일이기 때문에 여기에서는 분사 직후부터 물방울로 분화하는 것으로 전제한다.

1. 공기의 저항을 고려한 경우의 물방울의 운동방정식

(1) 운동하는 물방울이 받는 저항

물방울의 운동은 역학적인 조건의 설정이 적절하면 해석적으로 근사한 궤적(軌跡)을 구할수 있다. 여기에서 말하는 역학적 조건이란 대기중을 날아감으로서 받는 공기의 저항과 아울러 물방울에 주어지는 운동의 에너지이다.

저항의 크기는 물방울의 지름과 속도에 따라 달라진다. KUWANO⁽⁶⁾등과 UMIDA⁽²⁷⁾가 물방울의 도달거리를 구하는데 있어 적용한 운동방정식은 탄도식(彈道式)으로부터 유도한것인데 여기에서 취급한 저항은 평균적이고 단일적인것으로 취급하고 있을 뿐이며 속도 및 입경의 함수로서의 고려는 하고 있지 않다.

일반적으로 점성액체중을 물체가 이동할때 그 상대속도의 Reynold's number 가 작은 경우에는 주위의 유체는 점성에 의하여 전달되는 변위를

받을 뿐이고 그 힘은 속도에 비례한다고 한다⁽⁴⁾. 이 힘은 점성저항이라 일컬으며 물체를 구체(球體)로 취급할 때에는 Stokes 의 법칙에 따라 다음과 같이 표시된다.

$$F_s = 6\pi\gamma r v \dots\dots\dots(4)$$

식에서 F_s : 점성저항 γ : 액체의 점성계수
 r : 구체의 반지름
 v : 구체의 상대속도

한편 Reynold's number 가 커지면 후류영역(後流領域)이 발달하여 후류내에 소용돌이가 생김으로서 미치는 힘이 작용한다. 이 힘은 속도의 제곱에 비례하는 고로 관성저항(慣性抵抗)이라 칭하며 다음과 같이 Newton 의 저항 법칙으로 표시된다.

$$F_n = \frac{1}{2} C_D \cdot \pi r^2 \rho \cdot v^2 \dots\dots\dots(5)$$

식에서 F_n : 관성저항 C_D : 저항계수
 ρ : 유체의 밀도

Stokes 의 법칙은 Reynold's number $Re < 1$ 의 범위에서 실험치와 잘 일치한다는 것이 알려져 있다.

지금 물방울을 구체로 가정하고 $Re=1$ 로 되는 운동속도를 산정하면 표-3과 같이 된다.

〈표-3〉 $Re=1$ 의 운동속도

물방울의 반지름(mm)	0.25	1.0	3.0
운동속도(m/sec)	0.025	0.006	0.002

그런데 Sprinkler 로부터 분사되는 대부분의 물방울의 운동속도는 표-3의 속도보다는 매우 크다. 이를테면 노즐로부터 분사되는 초속도는 유속계수 $C_v=0.95$ 로하면 분사압력 $Pr=2.0 \text{ kg/cm}^2$ 에서 18.8 m/sec , $Pr=4.0 \text{ kg/cm}^2$ 에서는 21.7 m/sec 이다. 이 경우의 Reynold's number 는 표-4에서 보는 바와 같이 $10^2 \sim 10^4$ 의 값이

〈표-4〉 물방울과 Reynold's number

압력(kg/cm ²)	초속도(m/sec)	Re		
		지름 0.5mm	3mm	6mm
2	18.8	5.92×10^2	3.55×10^3	7.09×10^3
3	23.0	7.23×10^2	4.34×10^3	8.68×10^3
4	26.7	8.37×10^2	5.02×10^3	1.00×10^4

다. 따라서 살수되는 물방울의 운동에 관계있는 저항은 Newton의 법칙 즉 관성저항만이 작용하는 것으로 취급하면 된다.

한편 (5)식의 저항계수(Drag Coefficient) C_D 는 Re 에 따라 값이 달라진다. Rouse⁽¹⁹⁾의 실험에 의하면 $10 < Re < 10^2$ 의 범위에서 대략 $1 < C_D < 4$, $10^2 < Re < 10^3$ 에서 $0.45 < C_D < 1$, $10^3 < Re < 10^4$ 에서는 $C_D = 0.45$ 라고 한다.

Sprinkler 살수에서는 압력 2.0 kg/cm^2 의 경우에는 물방울의 지름 0.9 mm 이상의 것이, 압력 4.0 kg/cm^2 에서는 지름 0.7 mm 이상의 것이, $Re < 10^3$ 로 되어 $C_D = 0.45$ 로 주어진다. 이에 관해 Seginer⁽²⁰⁾는 물방울은 고속운동의 경우에는 구형을 유지하기 어려우며 따라서 저항계수의 개념만으로 운동저항을 규정한다는 것은 무리라는 것을 지적하고 C_D 에 상당하는 항을 지수(指數)로 하는 함수로서 저항력을 취급할 것을 제창하고 있다. Seginer는 이 지수를 Constant drag coefficient라고 칭하였는데 이값의 결정방법에 대하여서는 아직 검토할 여지가 많다고 본다. 따라서 여기에서는 저항계수를 사용한 Newton의 저항법칙에 따르는 물방울의 운동에 대하여 고찰하기로 한다.

(2) 물방울의 운동방정식

Sprinkler로부터의 분사는 Reynold's number가 큰 경우에 상당하니까 물방울이 받는 저항은 Newton의 저항법칙 즉 관성저항만이 작용하는 것으로 하고 X 축방향의 물방울의 운동에 대하여 고찰하면 다음과 같다(그림-6).

x 축방향

$$\rho_w \cdot V \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{1}{2} C_D \cdot \rho_a \cdot q^2 \cdot S \cdot \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dy^2}}$$

$$\rho_w \cdot V \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{C_D}{2} \cdot \rho_a \cdot q^2 \cdot S \cdot \frac{qx}{q}$$

$$\therefore \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{C_D}{2} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{S}{V} \cdot q \cdot q_x \dots (6.1)$$

식에서

$\rho_w = \frac{\gamma_w}{g}$: 물방울의 밀도
 g : 중력의 가속도 V : 물방울의 부피
 ρ_a : 공기의 밀도 γ_w : 물방울의 비중량
 S : 기준면에 대한 물방울의 투영면적

C_D : 저항계수 q : 물방울의 운동속도
 q_x, q_y : q 의 x, y 축방향의 분속도

한가지로 y 축방향의 운동은 다음과 같이 표시할 수 있다.

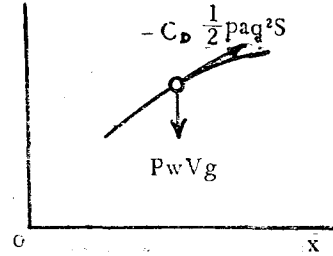


그림-6 공기 중에서 비산하는 물방울에 작용하는 힘

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{C_D}{2} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{S}{V} \cdot q \cdot q_y \dots (6.2)$$

(6.1), (6.2)식은 공기의 저항을 고려한 경우의 물방울의 운동방정식이다.

또한 물방울이 비산하는 동안 구체를 유지하는 것으로 하면

x 축방향 :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q \cdot q_x \dots (6.1)$$

y 축방향 :

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q \cdot q_y \dots (6.2)^1$$

단 D 는 물방울의 지름

2. 물방울이 비산하는 동안의 증발을 고려한 경우의 운동방정식

정지상태에 있는 물방울의 증발에 관해서는 이론적으로나 실험적인 연구결과가 많지만 Sprinkler로부터 비산하는 물방울의 증발손실은 비산되는 물방울의 입도범위가 넓고 또 비교적 빠른 속속도로부터 나르는 동안의 대비속도의 변화를 고려하면 상당히 복잡한 현상이 될 뿐더러 실지의 Sprinkler로부터 비산하는 경우 그 영역 내의 상대습도의 변화도 상당한 폭을 갖는다는 점도 추정할 수 있는 것으로서 이에 관한 연구결과는 별로 없다. 이에 관하여 INOUE⁽²²⁾는 열량평형(Heat balance)의 원리를 적용하여 (7)식

을 유도하였다.

$$D_0^2 - D^2 = 2C(1-H)t \dots\dots\dots (7)$$

식에서 D_0 : t 시간 = 0 에 있어서의 물방울의 지름(cm)

D : t 시간후의 물방울의 지름(cm)

$100H$: 상대습도

$$C = \frac{4D_i K \rho_o}{\rho_w \{K + D_i L (d\rho_o/d\theta)\}} \dots\dots\dots (8)$$

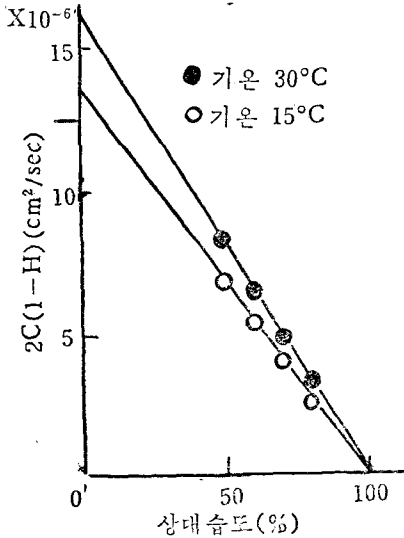


그림-7 각종 이상조건하에서의 $2C(1-H)t$ 의 계산값

단 K : 공기의 열전도율(cal/cm·s·c)

L : 물의 증발잠량(cal/gr)

θ : 공기의 온도(°C)

D_i : 환산계수(cm²/sec)

ρ_o : 온도 θ 에서의 포화증기밀도(g^3/cm^4)

여기에서 여러가지 공기조건에서의 $2C(1-H)$ 의 값은 그림-7과 같다.

(7)식으로부터 비산중의 물방울에서의 증발에 의한 입도의 변화를 고려하여 (6.1)¹, (6.2)¹ 의 운동방정식을 수정하면 다음과 같다.

x 축방향 :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4\sqrt{D_0^2 - 2C(1-H)t}} \cdot q \cdot qx \dots\dots\dots (6.1)$$

y 축방향 :

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4\sqrt{D_0^2 - 2C(1-H)t}} \cdot q \cdot q_y - g \dots\dots\dots (6.2)^{11}$$

정지상태의 공기 중에서의 물방울의 운동곡선을 대상으로 하는 경우 증발량이 크게 영향을 미치는 것으로 여겨지는 30°C에서 상대습도 50%, 80%, 90%의 경우에 대하여 비산시간과 물방울의 입경변화를 (7)식으로 계산한 결과는 표-5와 같다.

그런데 보통 평지에서의 비산시간은 2.5초를

〈표-5〉 비산시간과 물방울의 증발손실

$t=30^\circ\text{C} \quad h=90\%$						
D_0	0.15mm	0.25	0.50	2.00	4.00	6.00
T(sec)						
0.9	0.14952	0.24971	0.49986	1.99996	3.99998	5.99998
1.0	0.14947	0.24968	0.49984	1.99996	3.99997	5.99998
1.5	0.14920	0.24956	0.49975	1.99994	3.99996	5.99997
2.0	0.14893	0.24936	0.49968	1.99992	3.99995	5.99997
2.5	0.14866	0.24930	0.49960	1.99990	3.99994	5.99996
5.0	0.14731	0.24839	0.49920	1.99980	3.99990	5.99993
$t=30^\circ\text{C} \quad h=80\%$						
D_0	0.15	0.25	0.50	2.00	4.00	6.00
T						
0.9	0.14904	0.24924	0.49971	1.99992	3.99996	5.99997
1.0	0.14893	0.24936	0.49968	1.99991	3.99995	5.99997
1.5	0.14839	0.24904	0.49952	1.99987	3.99993	5.99995
2.0	0.14785	0.24872	0.49936	1.99980	3.99991	5.99994
2.5	0.14731	0.24839	0.49920	1.99970	3.99989	5.99993
5.0	0.14457	0.24678	0.49840	1.99960	3.99980	5.99987

$t=30^{\circ}\text{C}$ $h=50\%$

D_0	0.15	0.25	0.50	2.00	4.00	6.00
T						
0.9	0.14758	0.24859	0.49928	1.99981	3.99990	5.99993
1.0	0.14731	0.24839	0.49920	1.99979	3.99989	5.99993
1.5	0.14595	0.24759	0.49880	1.99969	3.99984	5.99989
2.0	0.14457	0.24673	0.49840	1.99959	3.99979	5.99986
2.5	0.14318	0.24597	0.49800	1.99949	3.99974	5.99983
5.0	0.13601	0.24187	0.49598	1.99900	3.99950	5.99967

넘는일이 없으며 45° 의 급경사지의 아래편에 대하여도 약 5초면 도달한다. 표-5에서 분명한 바와 같이 물방울의 증발손실이 입경의 변화에 미치는 영향은 보통의 경우 극히 작으며 입경 0.5 mm 이상의 물방울의 운동을 대상으로 하는 경우에는 증발손실의 영향은 무시하고 (6.1)', (6.2)'의 운동방정식을 적용하여도 충분한 것으로 인정된다.

3. 물방울의 운동궤적과 그 도달거리의 결정

노즐의 분사각도, 분사수압 및 물방울의 크기 등이 주어지면 (6.1)', (6.2)' 식에 의하여 그 물방울의 비산운동의 궤적좌표를 계산할 수 있다. 이 좌표를 연결한 곡선에 대상으로하는 경형단면을 적용하면 그 물방울의 도달지점을 구할 수 있다. 여러가지 지형에 대하여 도달점을 검토코저하는 경우에는 상당히 광범위의 비산운동의 궤적을 구하여 놓아야 한다. 이 추적(追跡)의 범위를 결정하는 것은 방향계수(方向係數)이며 상향방향에는 (+), 낙하방향에는 (-)로 된다.

동일지점에서도 분사각도나 Riser의 높이가 달라지면 물방울의 지표 도달거리는 달라진다. 이와같은 여러가지 조건에 대하여 그 궤적을 구하여 놓으면 Sprinkler의 종류에 따른 낙하도달지점의 차이나 나아가서는 살수분포의 차이도 분명해진다. 이 계산에서 설정한 초기조건과 결과는 다음과 같다.

(1) 초기조건(初期條件)의 설정

(가) Sprinkler는 중간압식이고 노즐의 구경

(口徑)과 분사양각은 표-6과 같다.

(나) 분사수압은 2, 3, 4 kg/cm²의 3종이며 압력별 초속과 유량은 표-7과 같다.

〈표-6〉 노즐의구경과 분사양각

노즐종별	구경(mm)	양각(°)
주노즐	4.9	23
부노즐	2.4	17

〈표-7〉 초속과 유량

압력(kg/cm ²)	2.0	3.0	4.0	
초속(m/sec)	18.80	23.05	26.60	
유량(l/min)	주노즐	19.70	24.30	28.10
	부노즐	5.00	6.15	7.20

(다) 공기의 밀도는 30°C 에서 $\rho=0.001165$ g/cm³, 물의 밀도는 $\rho_w=1.0$

(라) 저항계수는 물방울을 구체로 가정하고 Wiese/sberger의 $Re-C_D$ 실험곡선⁽¹⁹⁾을 이용하여 다음과 같이 정하였다.

물방울의 지름 $D < 0.0015\text{m}$ 인때 $C_D = 0.5 \sim 0.6$

“ $D \geq 0.0015\text{m}$ 인때 $C_D = 0.45$

(리) 계산에 사용한 물방울의 지름 D 는 다음의 10종으로 하였다. 즉

0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0,

그러나 물방울의 지름을 실측한결과 이 Sprinkler의 최장도달거리(最長到達距離)에서 평균 최대지름이 주노즐에서는 6.0mm, 부노즐에서는 약 3.0mm였으므로 물방울 분포의 해석에 사용한 물방울의 운동궤적은 실측한 최대물방울의 지름을 가지고 상한으로 하였다.

(니) 지표에서의 살수량 분포의 해석에 있어서

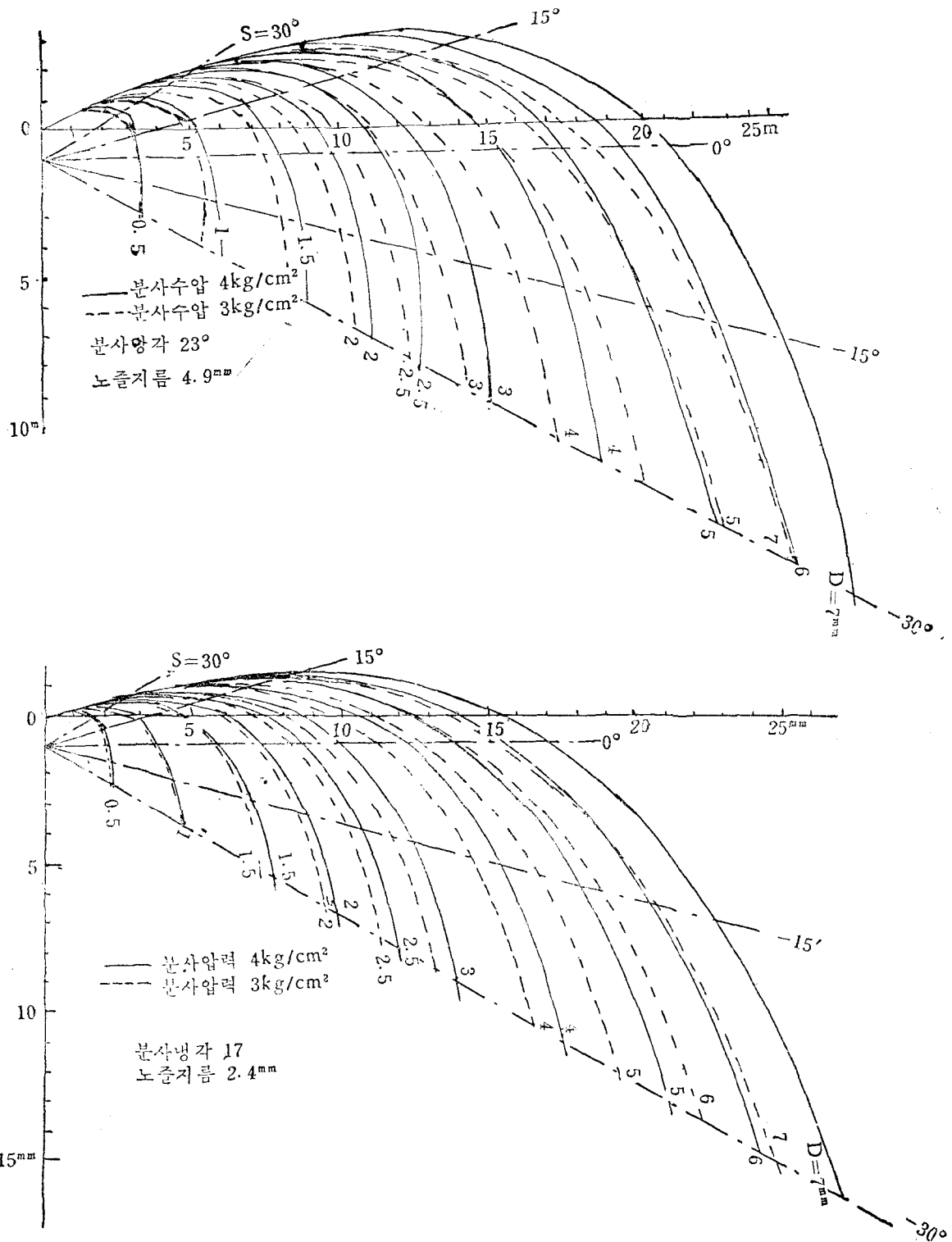


그림-8 분사 물방울의 비산 궤적(주노즐)

는 지형을 단순한 1면 경사의 경우를 상정하고 경사각은 15°, 30°로 하고 비교 대조하기 위하여 평탄지(0°)를 합한 3종으로 하였다.

(2) 물방울의 운동과적

바람이 없는 조건하에서의 Sprinkler로 살수 되는 물방울의 비산과적을 전기한 조건에 따라 물방울의 지름별, 분사수압 별로 계산하여 그린 것이 그림-8이다. 그림-8.1은 주노즐의 물방울의 비산과적이고 그림-8.2는 부노즐의 비산과적이다.

주노즐과 부노즐의 물방울의 운동행이 다른것은 분사양각의 차이에 기인한다. 부노즐은 근거리살수를 목적으로 하는것이기에 때문에 분사양각을 작게하여 평지에서의 도달거리가 짧게 되도록 설계되어 있다. 그러나 살수대상면이 경사지인 때에는 하방경사가 크게될수록 하방에 있어 주노즐의 물방울의 운동과적과 접근하는 케도로 된다. 이는 같은 크기의 물방울에서는 부노즐의 물방울이 주노즐의 물방울에 비하여 보다큰 수평분속도를 갖게되는데 기인하는 것이다.

(3) 물방울의 지름과 도달거리

위의 계산결과와 그림-8로부터 물방울의 크기와 지상에의 도달거리의 관계를 구하면 그림-9와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 압력이 클수록, 물

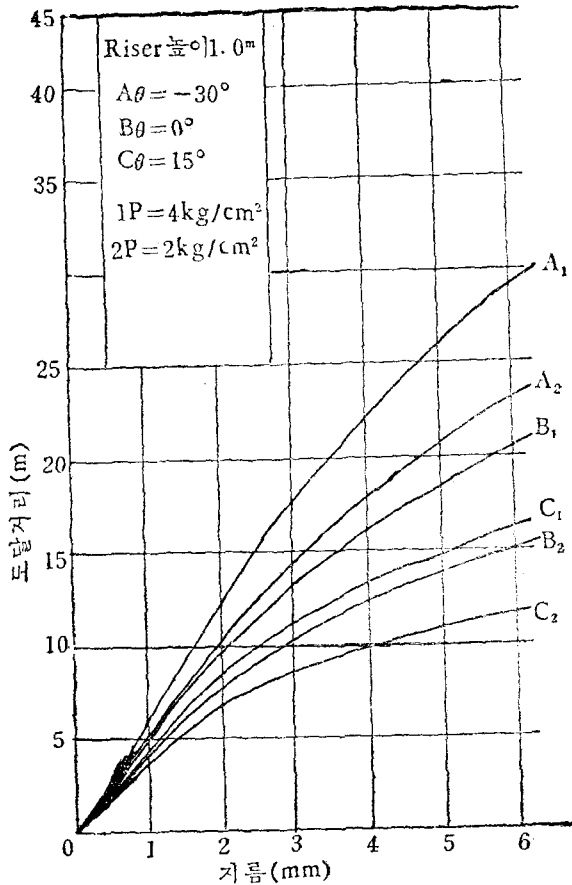


그림-9 물방울의 지름과 도달 거리의 관계

- Pr=2kg/cm²
- Pr=3kg/cm²
- × Pr=4kg/cm²
- Pr=2kg/cm²
- Pr=3kg/cm²
- - - Pr=4kg/cm²

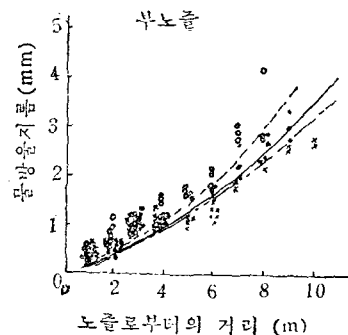
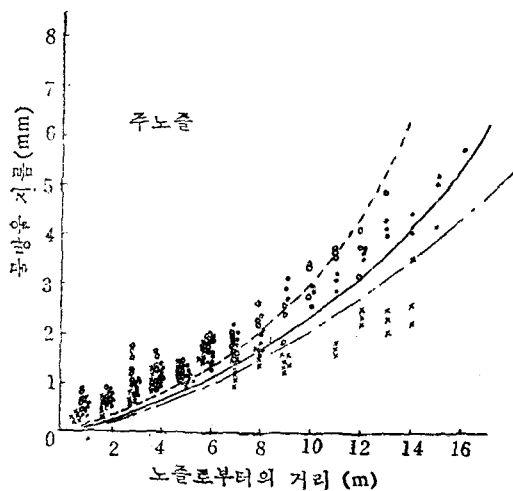


그림-10 물방울의 도달거리

방울이 클수록 도달거리가 큰 것을 알 수 있으며 동일압력, 동일 크기의 물방울도 경사가 (+)의 경우와 (-)의 경우와는 도달거리에 현격한 차이가 있음도 알 수 있다. 이에 대하여서는 (6)에서 자세히 논급키로한다.

일반적으로 물방울의 지표도달거리는 수압, 물방울의 크기, Riser의 높이, 토지의 경사도 및 분사각 등에 따라 다르다. 이 중에서 물방울의 크기와 관계를 검토 고찰하면 다음과 같다.

평지에서 실측을 통하여 얻은 물방울의 도달거리와 물방울 운동의 궤적곡선을 통하여 구한 도달거리와는 그림-10에서 보는 바와 같이 큰 물방울에 있어서는 거의 일치하지만 작은 물방울에 있어서는 양자간에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 같은 지름의 물방울에 있어 계산값이 실측값보다 크게되는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 물방울이 받는 저항을 Newton의 저항법칙에 의한 판성저항만을 받는 것으로 전제하여 계산을 한 결과라고 생각되며 실지에 있어서는 작은 물방울이 받는 저항은 Stokes의 점성저항의 영향도 있는 것으로 여겨진다. 따라서 큰 C_D 의 값을 취하는 Stokes의 식을 사용하던가 또는 Newton의 식을 적용하되 C_D 의 값을 더 크게 취하면 실측값과 보다 잘 일치 할 것으로 추정된다. 즉 본 계산에 사용한 C_D 의 값은 지름 1.5mm 이상의 물방울에 대해서는 $C_D=0.45$ 로, 0.2, 0.5, 1.0mm의 것에 대해서는 $C_D=0.50$ 으로 하였는데 작은 지름의 것에 대하여서는 $C_D \geq 0.6$ 정도로 하는 것이 바람직하다.

4. 단일 Sprinkler에 의한 평탄지에 서의 살포도형에 관한 시험

(1) 재료 및 방법

그림-11에 표시한바와 같이 12등분한 방사선상에 1.0m 간격으로 12개씩, 합계 144개의 Can을 배치하였다. 살수기의 압력은 2.0, 3.0, 4.0 kg/cm^2 의 3종이며 Sprinkler의 조작은 최초에는 주노즐과 부노즐을 동시에 작동시키고 다음에 부노즐은 닫고 주노즐만으로 살수 하였다.

(2) 결과 및 고찰

살수량의 측정결과를 표시한것이 그림-12이

다. 살수량의 분포를 파악하기 위한 측정은 원칙적으로 Sprinkler를 통과하는 한 방향에 대해서만 정확히 실시하고 그에 대한 정확한 살수심 단면이 얻어지면 되는 것이며 살수전역에 걸쳐 측정할 필요는 없다. 그러나 본 시험에서는 검토 수정을 하기 위하여 살포전역에 대하여 Can을 배치 측정하였다. 그림-12는 Sprinkler를 중심으로 4방향에 대하여 측정하고 그 평균값을 취함으로써 바람의 영향으로 생긴 근소한 오차를 상쇄하여 작성한 것이다. 그림-12에서 ①은

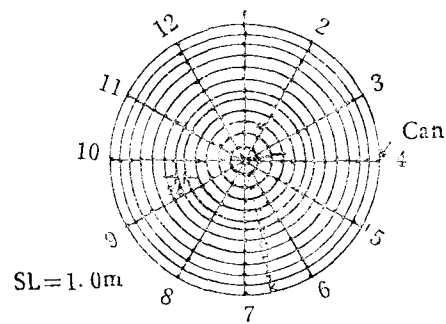


그림-11 캔 배치도

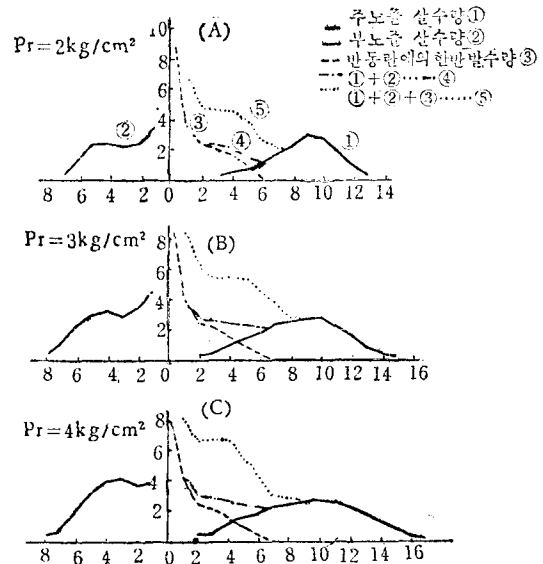


그림-12 스프링클러의 살수심 단면

주노즐만의 살수량이고 ②는 부노즐만의 살수량이며 ③은 반동간(反動桿)에 의한 반발수량이다. ④는 주노즐에 의한 살수량과 반발수량의 합계이며 ⑤는 주, 부노즐의 살수량과 반발수량의 합계이다. 그림의 부노즐의 살수심은 전체 노즐의 측정값에서 주노즐의 측정값을 뺀 값이다.

한편 물방울의 운동궤적을 결정함으로써 물방울의 평균지름별의 도달거리를 구할수가 있으니 이 관계와 위의 실험결과를 조합함으로써 물방울의 평균지름과 살수량을 대응시킬수 있다.

그림-13이 그 한 예이다. 이를 통하여 알수 있는 특질의 하나는 극대수심을 갖는 물방울의 지름은 주, 부노즐 다 같이 압력이 높은 것일수

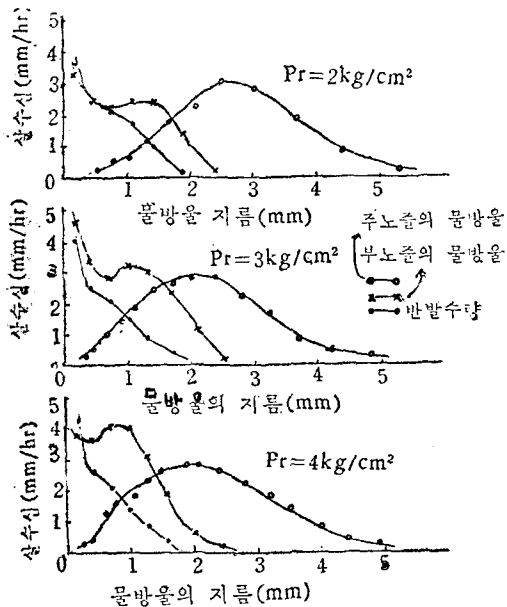


그림-13 살수심과 물방울 지름의 관계

특 적계되는 경향이 있다는 점이다. 노즐로부터 분사되는 물방울의 크기에 관여하는 인자에는 노즐의 지름, 압력, 점성등이 있으며 노즐의 지름이 작고 압력이 높을 때에 형성되는 물방울은 비교적 작은 물방울이 차지하는 비율이 많아진다는 일반적인 설명과도 합치한다.

5. 상한함수(上限函數)에 의한 살수 분포도형 및 물방울의 운동방정식과 입도분포의 확인

노즐로부터 분사되는 많은 물방울중에서 같은

크기의 물방울은 전부 같은속도, 분사각으로 되고 같은 궤적으로 낙하한다면 Sprinkler 를 회전시킬때 지표에 나타나는 물방울의 낙하평면분포형은 바람이 없는 조건의 평탄지에서는 물방울의 지름별로 도달거리를 반지름으로하는 동심원(同心円)으로 된다.

한편 (6.1)', (6.2)'식으로 물방울의 비산궤적을 결정할 수 있으니 물방울의 평균지름 별의 도달거리도 구할 수 있다. 이 관계와 전항의 실험결과를 조합 함으로써 물방울의 지름과 살수량과를 대응시킬 수 있다(그림-13).

또 물방울의 지름 별로 고유의 살수량을 갖는 것이니까 살수분포에서 한 선상의 살수심은 전부 같으며 인접한 판 종류의 물방울의 낙하선과의 사이에서는 물방울의 지름의 변화가 직선적으로 연속되는 것으로 하면 분사지점을 통과하는 선상의 임의의 위치의 물방울의 낙하선 사이의 거리는 물방울 지름의 변화와 비례관계가 성립하는 것으로 취급할 수 있고 따라서 그 위치에 낙하할 물방울의 지름을 추정할 수 있다. 이와 같이 하여 결정된 물방울의 지름에 그림-13의 관계를 적용하면 그 위치에 있을 살수심의 값을 얻을 수 있다. 이와 같이 하여 각 위치에서의 살수심을 추정할 수 있는 것이다.

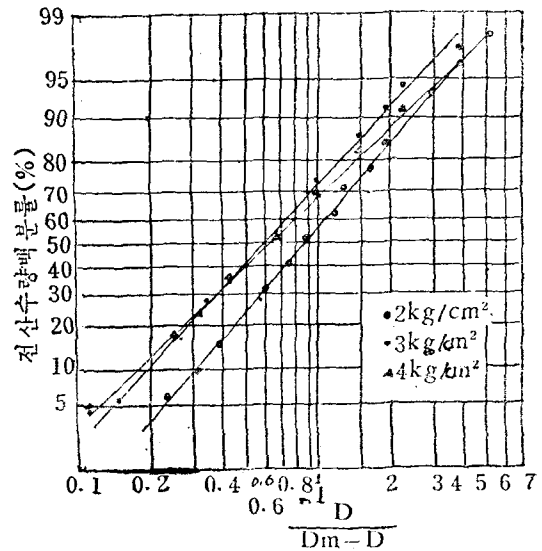


그림-14 상환해석

한편 대수확율지상에 중축에는 적산수량백분율(積算水量百分率)을, 횡축에는 입경 D 와 최대입경 D_m 와의 편차 (D_m-D) 와의비 즉 $D/(D_m-D)$ 를 취하여 표시하면 그림-14에서 보는바와 같이 대략 직선으로 된다. 이는 Sprinkler 살수에 의한 물방울의 입도분포가 Mugal와 Evans⁽¹⁰⁾에 의하여 제창된 상한함수(Upper-limit function)에 따른다는 것을 의미한다. 또 이 상한 함수는 실지의 실험 Data와 정확히 일치한다는 것이 확인된 사실로부터 본 연구에 사용한 이론적인 물방울의 운동방정식과 그 해석도 실지와 잘 일치한다고 여겨진다.

6. 경사면에서의 살수분포

(1) 경사도와 물방울의 도달거리

경사면에서의 물방울의 도달거리를 구하는데는 그림-8이 기초가 된다. 곡선의 시점 즉 분사위치를 기준으로하고 이것으로부터 수직하방에 취한 Riser의 높이에 상당하는 위치를 원점으로 한다. 이 원점을 통하여 지면의 경사도에 해당하는 경사선을 그리고 곡선과의 교차점까지의 거리를 측정함으로써 얻을 수 있다. 그림-8은 하방 경사도 30°까지의 경사면의 경우에 적

용할 수 있다.

지표면의 경사각도 별로 각 물방울의 도달거리를 표시한 것이 그림-15이다.

그림-15에서 보는바와 같이 경사각이 커질수록 Sprinkler의 하방에서는 물방울 사이의 도달거리의 차이가 넓어지는데 대하여 상방에서는 축소되고 40° 전후의 경사 특히 45° 이상으로되면 Riser의 높이 1.0m의 경우에는 어느 물방울이건 한정된 좁은 범위에 집중하게 된다. 즉 어느 물방울이건 방향계수가 크게 변화하지 않는 사이에 지표에 충돌하게 된다.

한편 경사방향의 상방과 하방의 도달거리를 평탄지의 경우에 대한 비(比)로 비교한 것이 그림-16이다.

주, 부노즐 다같이 하방도달거리의 연장율은 상방의 축소율에 비하여 약간 작은데 상대적인 살수직경의 변화나 또는 살수면적의 증감은 근소한 것으로 보아도 무방하다. 그러나 앞서 말한 바와 같이 Riser의 높이 1.0m에서는 경사도 40°정도이면 비탈면 상방에서의 축소율의 변화는 없어지니까 하방에서의 확대만이, 주되는 살수면적으로 된다. 따라서 이와 같은 경우에는 상방에서의 살수강도가 대단히 크게되고 관계효율의 저하와 토양의 침식을 초래하게 되어 좋지 못한 결과를 가져오는 것이니까 40° 이상의 급경

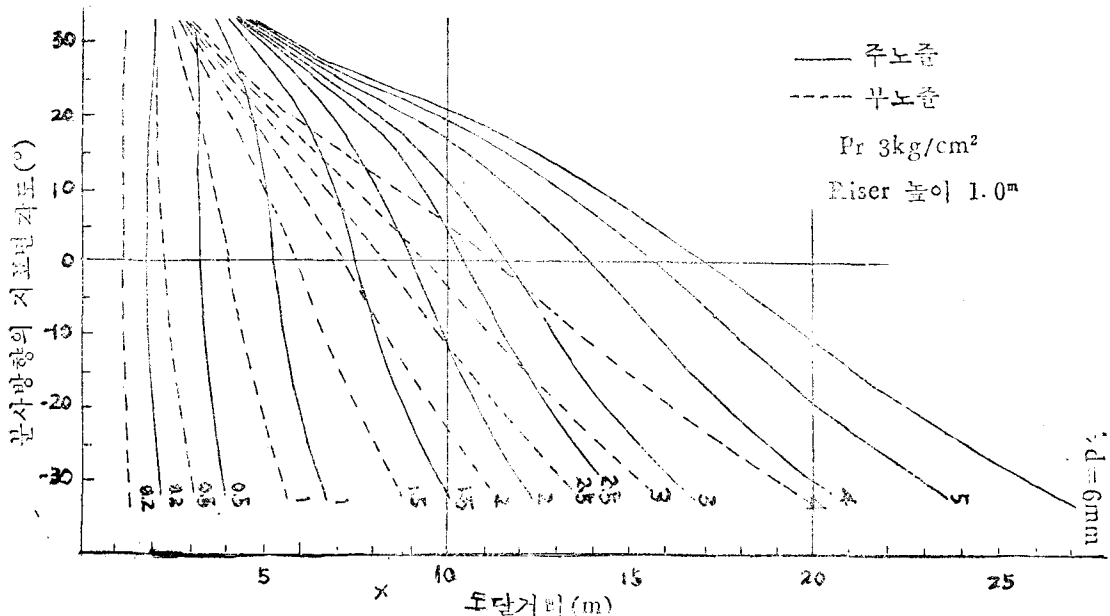


그림-15 지표면의 각도와 물방울의 도달거리

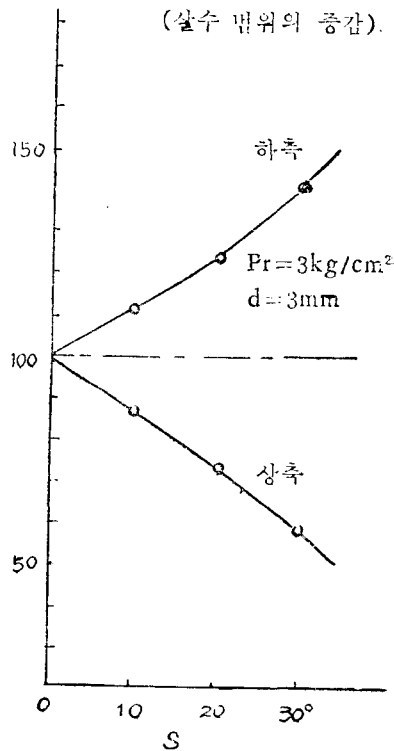
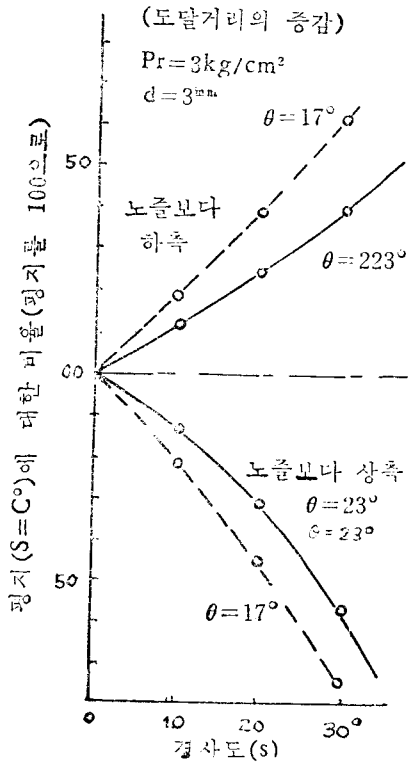
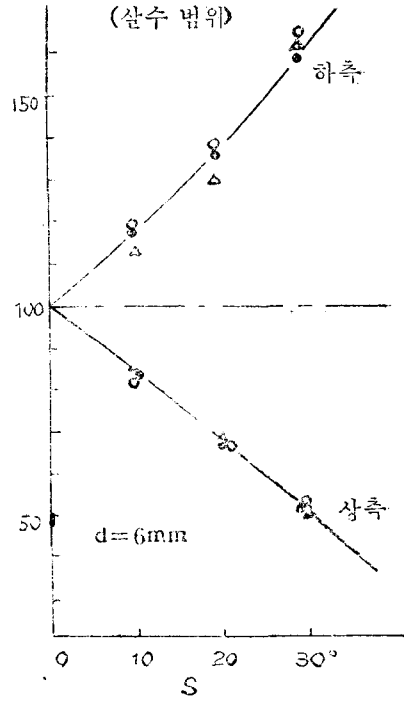
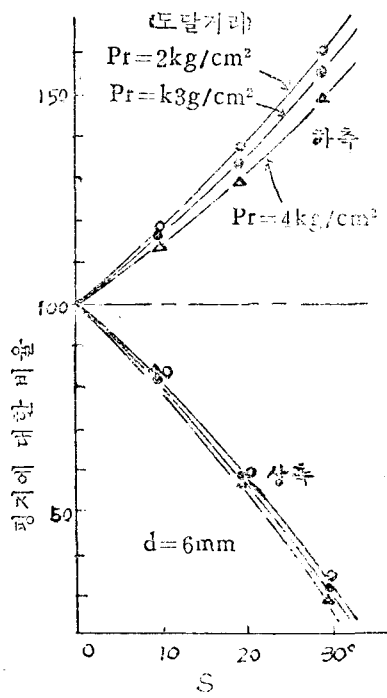


그림-16 경사도와 도달거리 및 살수범위의 증감관계

사지에서는 그 관개방법(살수방법)과 아울러 살수기에 대해서도 대폭적으로 개량할 필요가 있다고 본다.

(2) 경사면에서의 살수분포도의 추정

구릉경사지의 개발에 의한 목초지나 과수원 등의 조성에 수반하여 앞으로 경사면에 있어서의 균등 살포문제와 침식방지를 위한 적정 살포강도의 문제는 대단히 중요한 실지적인 문제로 제기 될것이 예상된다. 이미 (2)의 그림-8에 표시한 각종 압력 및 물방울의 운동과적을 이용하고 전항에서 설명한 바에 의하여 모든 경사각에 대한 물방울의 도달위치를 결정할 수 있다. 즉 경사면에서의 Sprinkler를 통과하는 방사선상의 물방울의 도달지점을 결정할 수 있다. 그림-17, 18의 하부는 압력 3.4kg/cm²에서의 경사각 15° 및 30°의 비탈면 위의 물방울의 도달선도이다. 한편 (4)에서 설명한 바와 같이 Sprinkler의 압력과 노즐의 지름 별로 노즐로부터의 거리에 대한 살수분포량을 얻을 수 있다. 또는 이 각지점에서의 살수심은 전항 (1)에서 논급한 바와 같은 방법으로도 구할 수 있다. 이와 같이 하여 구한 Sprinkler로부터의 거리에 상당하는 살수심을 경사면상의 Sprinkler를 통과하는 방사선상에 옮기고 그 등수점(等水點)을 연결함으로써 경사면에 있어서의 살수분포를 추정할 수 있는 것이며 그림-17, 18의 윗편 그림이 그 예이다.

이때 정상적이 아닌 Sprinkler에 지극히 가까운 곳에서의 세립(細粒)의 물방울을 제외하고는 이와 같은 살수분포의 추정은 고도의 신뢰성을 갖는 것으로 믿는다. 그림-17, 18은 경사도 15° 및 30°의 경사면에 대하여 추정한 살수분포도이지만 위의 방법을 적용하면 임의의 경사면에 대한 살수분포도를 추정할 수 있다.

이 그림을 통하여 특히 주목할 것은 경사도가 급할수록 경사면의 상류측에서는 분포가 과밀(過密) 상태로 되고 반대로 하류측에서는 과소(過疎) 상태로 된다는 점이다. 따라서 살수강도가 과대하게 되어 토양침식을 초래하게 될 우려가 있고 지표유거수(流水水)가 많아져서 살수효율의 저하를 가져올 가능성이 있으니 살수량의 조

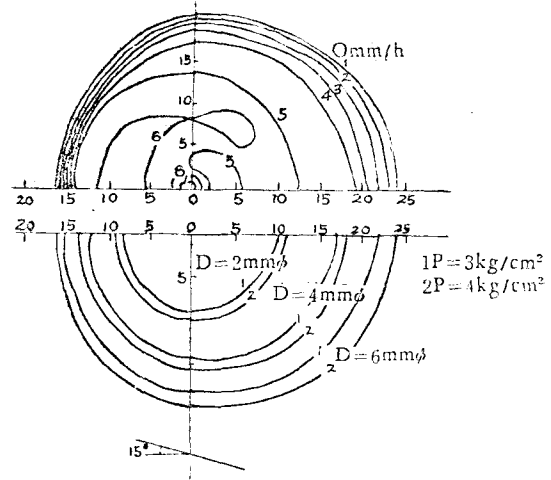


그림-17 15°경사면에서의 살포 입도의 분포 (1개의 스프링클러)

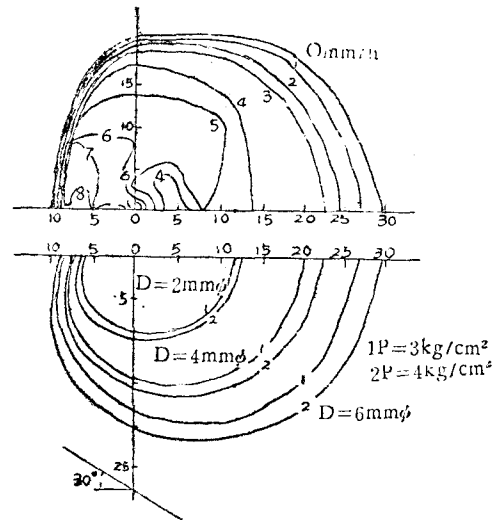


그림-18 30°경사면에서의 살포입도의 분포

절이나 살수기의 구조개선 등의 문제도 고려할 필요가 있다.

Ⅲ. 종합결론

(1) 물방울의 지름과 도달거리의 관계

노즐로부터 방사되는 물방울의 각 도달지점에서 평균지름은 거리가 멀어짐에 따라 커지고 가장 먼 곳에 가장 큰지름의 것이 낙하한다. 그리고 지름별 물방울의 분포상황은 거리를 제곱근 눈금으로 취하고 지름을 대수눈금으로 취하여 표시하면 그림-2에서 보는 바와 같이 직선적인 관계가 성립한다.

(2) 물방울의 지름과 살수량의 관계

살수현상에 있어서는 물방울 지름별의 고유수량과 물방울 지름의 상한해석값 사이에는 완전한 정규분포의 관계가 성립하는 것이며 이 점이 바로 살수되는 물방울이 갖는 특성이다.

(3) 공기의 저항을 고려한 경우의 물방울의 운동방정식

물방울의 운동궤적을 구하는데는 Newton의 저항법칙 즉 관성저항만이 작용하는 것으로하여 유도한 (6.1)', (6.2)'식을 이용하면 된다.

(4) 물방울이 비산하는 동안의 증발을 고려한 경우의 운동방정식

열량평형의 원리를 적용하여 유도한 (8)식으로부터 비산중의 물방울에서의 증발에 의한 입도변화를 고려하여 (7.1)', (7.2)'의 운동방정식을 수정하여 (7.1)", (7.2)"식을 유도할 수 있으나 물방울에서의 증발손실이 입경의 변화에 미치는 영향은 보통의 경우 극히 작은 것이니까 입경 0.5mm 이상의 물방울의 운동을 대상으로 하는 경우에는 증발손실의 영향은 무시하고 (6.1)', (6.2)'의 운동방정식을 그대로 적용하여도 무방하다고 인정된다.

(5) 물방울의 운동궤적

노즐의 분사각도, 분사수압 및 물방울의 크기 등이 주어지면 바람이 없는 조건하에서의 Sprinkler로 살수되는 물방울의 운동궤적을 (6.1)', (6.2)'식에 의하여 그릴 수 있으며 그 한 예가

그림-8이다.

(6) 물방울의 크기와 지상에의 도달거리

물방울의 운동궤적곡선과 그 계산결과로부터 물방울의 크기와 지상에의 도달거리 사이의 관계를 파악할 수 있다(그림-9).

일반적으로 물방울의 지표도달거리는 분사수압, 물방울의 크기, Riser의 높이, 토지의 경사도, 분사각 등 에 따라 다르다.

(7) 평지에서 실측상으로 얻은 물방울의 도달거리와 물방울 운동의 궤적곡선을 통하여 구한 도달거리와는 큰 물방울에 있어서는 거의 완전히 일치하나 작은 물방울에 있어서는 양자간에 상당한 차이가 있다(그림-10). 따라서 작은 물방울이 받는 저항은 Stokes의 점성저항의 영향도 관성저항과 아울러 고려하여야 할 것으로 본다.

(8) 단일 Sprinkler 에 의한 평탄지에서의 살포도형

노즐로부터 분사되는 물방울의 크기에 관여하는 인자에는 노즐의 지름, 압력, 점성등이 있으며 노즐의 지름이 작고 압력이 높을 때에 형성되는 물방울은 비교적으로 작은 물방울이 차지하는 비율이 커진다. 또 극대살수심을 갖는 물방울의 지름은 주, 부노즐 다 같이 압력이 높은것일수록 적게되는 경향이 있다.

(9) 그림-5 및 그림-14로부터 Sprinkler 살수에 의한 물방울의 입도분포는 Mugel & Evans에 의하여 제창된 상한함수에 따른다는 것을 알 수 있다. 또 상한함수는 실지의 실험치와 정확히 일치한다는 사실에 비추어 본 연구에 사용한 이론적인 물방울의 운동방정식과 그 해석도 실지와 잘 일치한다고 인정할 수 있다.

(10) 경사면에서의 살수분포

경사면에서의 살수되는 물방울의 도달거리는 그림-8로부터 구할 수 있는 동시에 살수압력과 노즐의 지름별로 노즐로부터의 거리에 대한 살수분포량을 얻을 수 있으니까 이를 조합하여 경사면에서의 살수분포도를 추정할 수 있다 (그림-17, 18).

한편 경사도가 급할수록 특히 40° 이상이 되면 경사면의 상류측에서는 분포가 과밀상태로 되고 반대로 하류측에서는 과소상태로 된다. 따라서 급경사지에서 사용할 Sprinkler는 그 구조를 평탄지용과는 달리 하여야 효율적이고 균등한 산수를 할 수 있다.

□ 참고 문헌 □

- (1) INOVE, H. (1963) On drop size distribution in sprays emitted by a sprinkler under different conditions. 春川大農學部報告 14 (2) 160p.
- (2) INOVE, H. (1962) On size distribution and evaporation losses from spray droplets emitted by a sprinkler. 春川大農學部報告 13 (2) 202p.
- (3) INOVE, H. (1963) Stains produced by water drops on sheets of filter paper. 春川大農學部報告 14 (3) 161p.
- (4) ISHIHARA, F. HOMMA, J. (1957) 應用水理學(上) 丸善發行
- (5) KUWANO, S. FUKUJIMA, T. (1965) 斜而散水の均一化に關する研究, 畑地農業 No. 81. 170p.
- (6) LIDDELL, H.F. and WOOTTEN, N.W. (1957). Quart. J. Roy, Met. Soc. 83, 263p.
- (7) MARUYAMA, H. and HAMA, K. (1954). Ibid. Ser. II No. 32 167p.
- (8) MASON, B. J. and RAMANDA, HAM. R. (1953). Quart, J, Roy, Met. Soc. 79, 490p.
- (9) MIZUNOE, M. (1970) 傾斜地かんがいにおける水分布の解析, 東海近畿農試研報19, 150p.
- (10) Mugele, R.A., Evans, H.D (1951) Ind Eng. Chem. 431. 1. 317p.
- (11) NIEDERDORFER, E. (1932). Met, Z. 49, 1p.
- (12) 농촌진흥청 농공이용연구소(1968) 1968년도 시립연구보고서 61~132p.
- (13) OKAMURA, V. (1968). 스프린클러-散水の理論的考察(I) 農士學會論文集 26. 49p.
- (14) OKAMURA, V. (1968) 스프린클러-散水の理論的考察(II) 農士學會論文集 26. 56p.
- (15) OKAMURA, V. (1968) 스프린클러-散水の理論的考察(III) 農士學會論文集 26. 62p.
- (16) OKAWA, T., FUNATA, M. (1962). 枝條架内の液滴の形狀について日本鹽學會誌 12 (4). 120p.
- (17) PIGFORD, R.L. and PYLE, C. (1951), Ind, Eng, Chem, 43. 1649p.
- (18) RICHARDSON, E.G. (1935). Flow properties of disperse systems. ed, by J.J. HERMANS, Amsterdam; North-Holland publishing Co.
- (19) ROUSE, H. (1938), Fluid mechanics for hydraulic engineers McGraw-Hill Inc. 215p.
- (20) SEGNER, I. (1965). Tangential Velocity of Sprinkler drops. Trans Ame, Soc. Agr, Eng, 8. 90p.
- (21) SHIRAI, K. (1959). 散水かんがいにおける損失水量, 三重大農研報 20. 61p.
- (22) SIVADJIAN, J. (1957). Quart. J. Roy, Met. Soc, 83, 372p.
- (23) SUGI, J. (1958), 枝條架における落水量分布, 日本鹽學會誌 12 (3) 137p.
- (24) SUGI, J. (1960). Sprinkler 研究 (1) 畑地かんがい 35. 4p.
- (25) TANASAWA, Y. (1960) 熱機關大系 6, デイゼル機關 1. 東京, 山海堂
- (26) TYLOR, E, H, HARMON, D.B. (1954). Ind, Eng, Chem, 46. 1. 455p.
- (27) UMITA, Y. FUJIOKA, Y. (1966) 스프린클러-散水の實驗的考察, 農士大會講論文集.
- (28) WOODWARD, G.O. (1959). Sprinkler Irrigation, 2nd, ed, Sprinkler Irrigation Assoc.