

## 파이프하우스의 構造安全에 關한 實驗的 研究<sup>1)</sup>

金文基 · 南相運\*

서울大學校 農工學科, \*安城産業大學校 農村開發學科

## Experimental Studies on the Structural Safety of Pipe-Houses

Kim, Moon-Ki Nam, Sang-Woon\*

Dept. of Agr. Eng., Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744

\*Dept. of Rural Dev., Anseong Nat'l Polytech. Univ. Anseong 456-749

### Summary

This study was carried out to make fundamental data for structural safety test of pipe-houses. Experiment on the stress distribution of pipe-houses was conducted to find suitable structural analysis model by examination of end support conditions of pipe. Besides, the loading test and the pile driving test were done to find pull-out capacity and bearing capacity of pipe on the assumption that pipe is pile foundation.

For single span pipe-house, the theoretical results assuming the end support condition of pipe is fixed under ground agreed closely with the experimental results of stress distribution. On the other hand for double span pipe-house, the end support conditions of pipe were fixed support when vertical load is applied, and hinged one when horizontal load is applied. The pull-out capacity and allowable bearing capacity of the pipe portion that was buried in the grounds that were soft soil of paddy field and midium or hard soils of dry field derived from experimental results.

키 워 드 : 파이프하우스, 구조안전시험, 지점상태, 인발저항, 지지력

Key words : pipe-houses, structural safety test, support condition, pull-out capacity, bearing capacity

### 서 론

우리나라의 시설재배 면적은 1970년 4,288 ha에서 1990년에는 41,747 ha로 20년 사이에 약 10배 증가하였으며 매년 급증하고 있으나, 시설의 현대화는 이에 따르지 못하고 있다<sup>1)</sup>. 국내 원예시설의 형태는 전체 시설면적의 84.9%가 파이프하

우스이며, 이들 온실들은 정확한 구조설계 없이 설치됨으로써 대부분 구조적인 취약점을 안고 있어 재해발생시에 안전성이 크게 위협받고 있다<sup>2,3)</sup>. 지난 94년초의 전남 및 경남 일원에 내린 폭설로 인한 피해의 대부분이 파이프하우스였던 것을 생각할때 구조적인 안전에 대한 중요성을 인식하고,

<sup>1)</sup>본 연구는 농촌진흥청 특정연구비로 수행되었음.

재해에 의한 피해를 경감할 수 있는 대책을 모색해야 할 것으로 판단된다.

파이프하우스의 경우 파이프를 지면에 30cm정도 매입한 상태이므로, 지점의 상태를 정확히 구분하기 어렵기 때문에 일반적으로 최대휨모멘트가 크게 나타나는 힌지로 가정하여 구조해석을 하고 있다<sup>2,3)</sup>. 그러나 지점의 상태에 따른 최대휨모멘트의 크기와 발생위치가 상이하므로, 보다 실제에 가까운 상태를 찾아 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

한편, 파이프하우스의 경우 대부분 기초를 하지 않고 파이프를 지면에 매입한 상태이므로, 폭설시에는 부등침하로 인하여 구조물이 파손될 가능성이 있고, 강풍시에는 인발력으로 인하여 기초가 뽑힐 염려가 있다. 특히 하우스는 40%가 발에 설치되고 있고 60%는 논에 설치하고 있는 것으로 보고되고 있는바<sup>6)</sup>, 논 토성은 대부분 점성토의 연한지반이므로 파이프하우스의 안전성면에서 더욱 문제가 될 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 파이프하우스의 구조적 안전성을 검토하는데 필요한 기초자료를 구축하기 위하여 모형 실험을 실시하였으며, 실험결과로부터 지면에 매입된 파이프의 지점상태를 검토하여 적합한 구조해석 모델을 찾고, 파이프를 말뚝기초로 가정했을 때의 파이프의 지지력 및 인발저항력을 구하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 지점상태의 검토를 위한 모형시험

파이프하우스의 경우 파이프를 지면에 30~40cm정도 매입한 상태이므로 설계시에 지점의 상태를 규정하기가 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 파이프에 모의하중을 재하하면서 응력을 실측하고, 지점상태를 고정과 힌지의 두가지 상태로 해석하여 이론적으로 구한 응력을 비교함으로써 적합한 지점의 상태를 찾아내고자 한다.

응력측정에 사용한 파이프하우스의 골조형태는 Fig.1과 같고, 골조재료는 펜타이트파이프로 직경 25mm, 두께 1.5mm이고, 지점은 지면에 30cm 깊

이로 매입한 상태이며, 2연동에서 중앙극부 기둥의 지점은 콘크리트기초로 하였다.

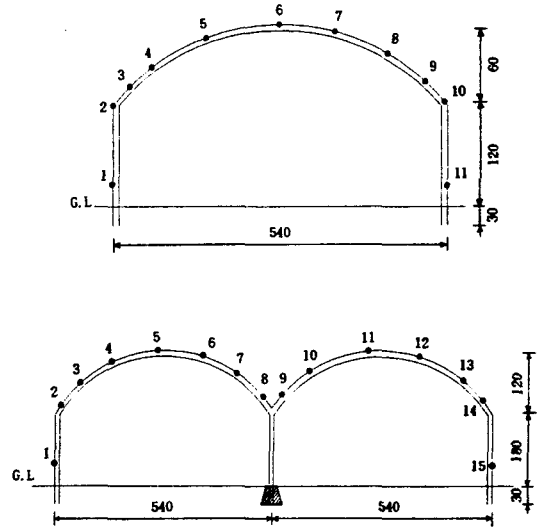


Fig. 1. Scale of experimental pipe-houses and points of stress measurement.(unit;cm)

모의하중은 Fig.2와 같은 하중재하장치를 제작하여, 설하중에 대하여는 연직방향으로 추를 매달고, 풍하중에 대하여는 도르래를 이용하여 추의 무게가 수평하중으로 작용하도록 하였다.

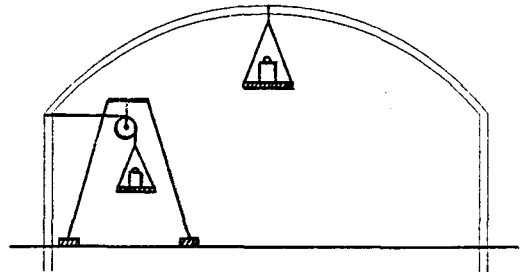


Fig. 2. Loading method of imitational loads.

응력측정은 스트레인게이지를 파이프 외면에 부착하여 1-게이지 방법으로 측정하였다. 스트레인

측정장치는 브리지회로 및 증폭회로를 구성하여 직류전압계(DMM)로 측정하였으며, 측정지점은 Fig.1에 표시된 바와 같다.

이때, 측정된 출력전압은 파이프 외측 선단의 변형에 비례하며 다음과 같은 관계를 갖는다.<sup>13)</sup>

$$E_0 = \frac{VF\epsilon}{4} \quad (1)$$

여기서,  $E_0$ 는 출력전압(volts),  $V$ 는 브리지 입력 전압(volts),  $F$ 는 게이지율(gage factor),  $\epsilon$ 은 변형율(mm/mm)이다. 본 실험에서는 게이지율 2.07  $\pm$  1%인 스트레인게이지를 사용하였다.

한편 응력과 변형율, 모멘트의 관계는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma = E\epsilon = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$ 는 응력(kg/cm<sup>2</sup>),  $M$ 은 휨모멘트(kg·cm),  $Z$ 는 단면계수(cm<sup>3</sup>)이다.

또, 식(1)과 (2)로 부터 휨모멘트( $M$ )는 다음식으로 나타난다.

$$M = \frac{4EZ}{VF} E_0 \quad (3)$$

즉, 스트레인 측정장치의 출력전압으로 부터 모멘트를 구할 수 있으며, 지점을 힌지와 고정으로 가정하여 구조해석으로 구한 모멘트와 비교하여 적합한 해석모델을 구하고자 하였다.

## 2. 기초의 지지력 및 인발저항 시험

지면에 매입된 파이프를 말뚝기초로 간주하여 지지력 및 인발저항을 시험하였다.

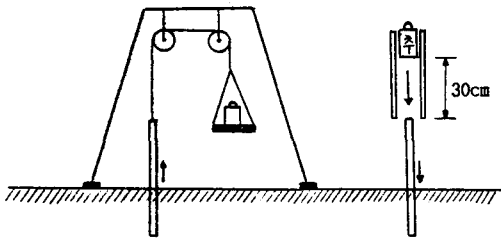


Fig. 3. Experimental apparatus for pull-out capacity and bearing capacity of pipe.

실험방법은 Fig.3과 같이 인발저항은 재하시험을 실시 하였고 지지력은 항타시험을 실시 하였다. 파이프는 농가에서 가장 많이 쓰고 있는 직경 22mm 및 25mm인 펜타이트 파이프를 30, 40, 50cm 길이로 매입하여 각각 실험을 실시하였다. 지반의 종류는 파이프하우스를 많이 설치하는 논과 밭에 대하여 연한지반(논), 보통지반(밭) 및 단단한지반(밭)의 3가지로 구분하여 실험을 실시 하였다.

지지력시험 방법은 무게 9kg의 추를 30cm 높이에서 낙하시켜 매입깊이에 도달될때까지의 타격회수를 10회 반복측정하고, 항타공식으로 극한지지력을 구하였다. 항타공식은 여러가지가 있지만 그중에서 가장 합리적인 것으로 알려진 Hiley공식을 적용하였다<sup>5,12)</sup>.

항타공식은 말뚝 해머의 낙하로 인한 운동에너지와 말뚝에 행한 일이 같다는 것을 기본으로 하고 있으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W \times h \times (\text{효율}) = R \times S + (\text{손실량}) \quad (4)$$

여기서,  $W$ 는 말뚝 해머의 무게,  $h$ 는 해머의 낙하고,  $R$ 는 말뚝의 저항력,  $S$ 는 1회 타격으로 인한 말뚝의 침하량이다.

효율은 해머의 종류에 따라 다르며 0.6~1.0까지 변하고, 손실량은 말뚝 및 흙의 탄성압축에 의한 손실에너지로 말뚝의 재료나 타격의 난이도에 따라서 경험적인 값을 이용하는 것으로서, 본 연구에서는 최하조건인 효율 0.6, 손실량 25%를 사용하였다. 한편, 말뚝의 허용지지력은 식(4)에서 구한 말뚝의 저항력을 안전율로 나누어 구하였으며, 안전율은 2.5로 하였다.

인발저항력은 도르래를 이용하여 파이프에 인발력이 생기도록 재하시험을 만들어 서서히 하중을 증가시키면서 파이프가 뽑히는 순간의 총하중을 측정하였다.

말뚝의 이론적인 인발저항력은 말뚝과 주변 흙과의 마찰력으로 부터 구할 수 있다.

$$R_i = \phi L \cdot f_s \quad (5)$$

여기서,  $R_i$ 는 말뚝의 인발저항력(t),  $\phi$ 는 말뚝의 둘레(m),  $L$ 은 매입깊이(m),  $f_s$ 는 말뚝과 주변 흙과의 마찰력(t/m<sup>2</sup>)이다.

윗식에서 파이프와 흙과의 마찰력은 제시된 자료가 없으므로, 인발저항력의 실험치로 부터 마찰력을 산출하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 파이프하우스의 지점상태 검토

파이프하우스의 지점상태를 검토하기 위하여 모의하중 재하시의 모멘트 측정치와 지점을 힌지와 고정으로 가정하여 구조해석한 결과를 비교한 것은 Table 1, Table 2 및 Fig.4와 같다.

대체적으로 모멘트의 측정치는 구조해석치에 비하여 상당히 작은 값으로 나타났으며, 절대 최대 휨모멘트도 어느경우나 구조해석치가 실측치 보다 크므로 힌지 또는 고정중 어느것으로 해석해도 안전면에서는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 응력분포의 경향이나 최대모멘트의 크기면에서 볼

때 단동의 경우에는 고정, 연동의 경우 수평하중 재하시는 힌지, 연직하중 재하시는 고정으로 해석하는 것이 실측치에 좀더 가까운 것으로 나타났다.

본 결과는 단동 연직하중에 대하여는 고 등<sup>1)</sup>, 小川 등<sup>2)</sup>의 실험과 동일한 결과를 나타냈으며, 연동 연직하중의 경우는 고 등<sup>1)</sup>의 실험과 상반된 결과를 나타내었다. 이는 연동의 중앙기둥은 대부분 콘크리트 기초를 사용하므로 본 연구에서는 이를 고정으로 취급하였으나, 고 등의 연구에서는 모두 파이프가 지반에 매입된 것으로 취급하여 실험조건이 상이했기 때문인 것으로 판단된다. 한편 수평하중에 대하여는 단동과 연동 모두 기존에 실험한 결과의 비교대상이 없었으며, 김 등<sup>2)</sup>의 연구에서는 안전을 고려하여 더 큰 응력이 발생하는 힌지로 가정하여 해석을 실시한 바 있으나 본 실험 결과 단동의 경우에는 고정으로 해석하는 것이 더 타당한 것으로 나타났다.

Table 1. Measured and calculated bending moment(kg · cm) of single span pipe-house.

Measuring point	Horizontal loading			Vertical loading		
	Measured <sup>1)</sup>	Structural analysis		Measured <sup>1)</sup>	Structural analysis	
		Hinged	Fixed		Hinged	Fixed
1	-47	-372	17	-33	124	-46
2	-147	-554	-193	100	249	157
3	-153	-525	-175	100	238	160
4	-147	-490	-160	107	226	161
5	-60	-318	-88	67	127	122
6	47	56	37	-259	-363	-301
7	79	197	59	-120	-25	-11
8	80	245	45	13	153	136
9	40	247	22	59	228	163
10	19	244	14	53	241	163
11	-99	228	-6	-39	145	-18
R <sup>2)</sup>	1.00	0.80	0.90	1.00	0.94	0.95

Note : 1) Average of 10 times measuring

2) R ; Correlation coefficient



2. 파이프의 인발저항력 및 기초의 지지력

1) 파이프의 인발저항력

파이프의 직경 및 매입깊이에 따라 지반종류별로 측정된 인발저항력은 Table 3과 같다. 표에서 보는바와 같이 인발저항력은 논의 연한지반(soft soil)에서는 파이프 직경 및 매입깊이에 따라 35~54kg, 발의 보통지반(medium soil)에서는 61~98kg, 단단한지반(hard soil)에서는 108~120kg이상으로 나타났다. 일반적으로 토질기초공학에서는 말뚝과 흙의 주변마찰력으로 점성토는  $(1.25 \pm 1)$

$\sim (7.5 \pm 2) t/m^2$ , 사질토는  $(4 \pm 1) \sim (12.5 \pm 5) t/m^2$ 의 범위를 제시하고 있으나 이것을 적용하기에는 상당한 가정이 필요하다.<sup>5,10)</sup> 또, 인발저항력의 측정치로부터 식(5)로 구한 파이프와 흙의 마찰력을 계산한 결과는 Table 4와 같이 연한지반(논)은  $1.51 t/m^2$ , 보통지반(밭)은  $2.6 t/m^2$ , 단단한지반(밭)은  $4.76 t/m^2$  정도이며 일반적으로 제시하는 범위에 들지만 상당히 낮은 쪽에 가까운 값을 알 수 있었다. 따라서 정확한 측정을 할 수 없는 경우 개략적인 토성을 판단하여 안전측의 값을 사용하면 될것으로 판단된다.

Table 3. Pull-out capacity(kg) of several soils with pipe diameter and driving depth.

Pipe		Soft soil		Medium soil		Hard soil	
Dia.	Driving depth	Average	Standard error	Average	Standard error	Average	Standard error
22mm	30cm	35.0	$\pm 5.1$	61.0	$\pm 5.2$	108.7	$\pm 3.3$
	40cm	42.0	$\pm 4.1$	64.0	$\pm 2.6$	120.0	$\pm 4.1$
	50cm	48.4	$\pm 5.4$	69.4	$\pm 5.8$	—	—
25mm	30cm	39.2	$\pm 3.0$	74.6	$\pm 6.8$	111.3	$\pm 3.3$
	40cm	43.8	$\pm 2.1$	84.2	$\pm 7.8$	—	—
	50cm	54.0	$\pm 6.8$	97.5	$\pm 8.1$	—	—

Table 4. Frictions( $t/m^2$ ) between soil and surface of pipe.

Pipe dia.	Soft soil		Medium soil		Hard soil	
	Average	Standard error	Average	Standard error	Average	Standard error
22mm	1.54	$\pm 0.20$	2.42	$\pm 0.18$	4.79	$\pm 0.16$
25mm	1.48	$\pm 0.14$	2.78	0.25	4.72	0.14
Average	1.51	$\pm 0.17$	2.60	0.22	4.76	0.15

2) 파이프의 허용지지력

파이프의 지지력을 예측하기 위하여 실시한 항타실험 결과 파이프 직경, 매입깊이 및 지반종류별 타격회수는 Table 5와 같다. 타격회수에 따른 에너지 관계로부터 Hiley공식을 이용하여 구한 지지력은 Table 6과 같다. 연한지반의 경우 파이프 직경 및 매입깊이에 따라 지지력은 35~76kg,

보통지반은 88~158kg, 단단한지반은 131~305kg의 범위를 보였다.

실제 말뚝기초의 지지력은 측면마찰력과 선단지지력의 합이므로 측면마찰력을 마찰에 의한 인발저항력과 같은 값으로 가정할 경우 파이프의 선단지지력은 연한지반의 경우 0~22kg, 단단한 지반은 22~140kg의 범위를 나타냈다.

Table 5. Number of strike for driving test of pipe.

Pipe		Soft soil		Medium soil		Hard soil	
Dia.	Driving depth	Average	Standard error	Average	Standard error	Average	Standard error
22mm	30cm	21.4	±0.8	54.2	±2.2	80.7	± 7.7
	40cm	41.6	±1.7	80.6	±5.6	147.2	±15.1
	50cm	65.2	±2.4	105.3	±2.6	26.7	±13.4
25mm	30cm	27.4	±1.1	86.0	±2.9	89.7	±10.5
	40cm	48.0	±3.7	105.3	±4.6	201.1	±25.9
	50cm	78.2	±3.0	162.0	±7.4	313.7	±24.8

Table 6. Bearing capacity(kg) of several soils with pipe diameter and driving depth.

Pipe		Soft soil		Medium soil		Hard soil	
Dia.	Driving depth	Average	Standard error	Average	Standard error	Average	Standard error
22mm	30cm	34.7	±1.3	87.8	±3.6	130.7	±12.5
	40cm	50.5	±2.1	98.0	±6.8	178.9	±18.4
	50cm	63.4	±2.3	102.4	±2.5	260.2	±13.0
25mm	30cm	44.4	±1.8	99.3	±4.7	145.3	±17.0
	40cm	58.3	±4.5	128.0	±5.6	244.4	±31.5
	50cm	76.0	±2.9	157.5	±7.2	304.9	±24.1

한편 국내에서 많이 사용되고 있는 파이프하우스의 규격(폭 6m, 처마높이 1.8m, 지붕높이 3m, 골조간격 0.6m인 아치형 파이프하우스)에 대한 구조해석 결과, 적설심 및 풍속에 따라 기초에 작용하는 최대연직하중 및 최대인발력은 Table 7과

같다. 이 결과를 Table 3의 인발저항력 및 Table 6의 지지력과 비교해 보면, 25mm 파이프를 사용할 경우 적설심 30cm 까지는 파이프의 매입깊이가 30cm이면 충분하지만 그 이상의 적설심에서는 지반의 종류에 따라 매입깊이를 증가시켜야 한다.

Table 7. Maximum vertical load and pull-out force acting on foundation of pipe-houses.

Snow depth (cm)	Maximum vertical load(kg)			Wind speed (m/s)	Maximum pull-out force(kg)	
	Single span	Double span	Middle column of double span		Single span	Double span
20	27.0	27.2	61.7	20	14.4	14.0
30	40.5	40.7	92.5	30	32.4	31.5
40	54.0	54.3	123.3	40	57.6	56.0
50	67.5	67.9	154.1	50	90.0	87.5

인발저항력의 경우도 풍속 30m/s까지는 매입깊이 30cm이면 충분하나 40m/s의 경우 연한지반은 매입깊이를 50cm이상으로 하거나 보강이 필요하다.

## 적 요

본 연구는 파이프하우스의 구조적 안전성을 검토하는데 필요한 기초자료를 구축하기 위하여 실시하였다. 지반에 매입된 파이프의 지점상태를 검토하여 적합한 구조해석 모델을 찾고, 파이프를 말뚝기초로 가정했을때의 파이프의 지지력 및 인발저항력을 구하기 위하여 모형 실험을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 파이프하우스의 지점상태를 검토해본 결과 단동하우스에서는 수평 및 연직하중 모두 고정으로, 연동하우스에서는 수평하중 재하시 힌지, 연직하중 재하시 고정으로 해석하는 것이 실험치에 더 가까운 것으로 나타났다.

2. 지반에 매입된 파이프의 인발저항력은 파이프 직경 및 매입깊이에 따라 논의 연한지반에서는 35~54kg, 밭의 보통지반에서는 61~98kg, 단단한 지반에서는 108~120kg이상으로 나타났으며, 파이프와 흙사이의 주변마찰력은 1.51~4.76t/m<sup>2</sup> 정도의 범위를 보였다.

3. 파이프 직경 및 매입깊이에 따른 기초 지지력은 연한지반의 경우 35~76kg, 보통지반은 88~158kg, 단단한지반은 131~305kg의 범위를 보였으며, 파이프의 선단지지력은 연한지반 0~22kg, 단단한지반 22~140kg으로 나타났다.

4. 국내에서 많이 보급되어 있는 대표적인 파이프하우스의 경우, 적설심 30cm 까지는 파이프의 매입깊이가 30cm이면 지지력이 충분하지만 그 이상의 적설심에서는 지반의 종류에 따라 매입깊이를 증가시켜야 하고, 인발저항의 경우도 풍속 30m/s까지는 매입깊이 30cm이면 충분하지만 그 이상의 풍속에 대하여는 매입깊이를 증가시키거나 보강이 필요한 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 고재균, 김문기, 이신호. 1986. 하우스 안전구조 설정을 위한 역학적 연구. 농시논문집(농업산학협동편) : 251-266.
- 김문기, 고재균, 이신호. 1987. 플라스틱 하우스의 구조실태의 조사 연구. 한국농공학회지 29(3) : 113-124.
- 김문기, 손정익, 남상운, 1992. 생물생산시설의 구조설계에 관한 연구(2). 생물생산시설환경 1(2) : 148-153.
- 김문기, 신만균, 정두호, 김인수. 1994. 시설구조의 기준화 및 작물재배 연구. 농촌진흥청. pp199.
- 박병조. 1983. 기초공학. 야정문화사. pp334.
- 박중춘 外. 1992. 시설원예의 현대화 모델 하우스 설정 및 재배효과에 관한 연구. 농촌진흥청. pp106.
- 農林水産技術會議事務局. 1981. 高能率施設園藝に關する總合研究. pp28-69.
- 三原義秋. 1980. 溫室設計の基礎と實際. 養賢堂. pp273.
- 小川秀雄 外4人. 1989. 파이프하우스의強度に關する實驗的研究(1)-實物大實驗. 農業施設 19(3) : 29-38.
- 立花一雄, 羽倉弘人, 高橋和彦, 大塚榮. 1979. 施設園藝ハウスの設計と施工. オーム社. pp236.
- Barnes, M. and C. Mander. 1986. Farm building construction. Farming press Ltd. pp219.
- Bowles, J. E. 1988. Foundation analysis and design. McGraw-Hill book company. pp.1004.
- Mitchell, B. W. 1983. Instrumentation and measurement for environmental sciences. American society of agricultural engineers. pp. 2(1)-2(17).