파이프 서포트의 내력 산정 방안

이영욱† · 최순주*
군산대학교 건축공학과 · *산업안전보건연구원
(2001. 12. 30. 접수 / 2001. 3. 19. 채택)

A Proposed method of the Strength Calculation of Pipe Support

Young-Yuk Lee† · Sun-Ju Choi*
Department of Architectural Engineering, Kunsan National University · *Korea Occupational Safety and Health Agency
(Received December 30, 2001 / Accepted March 19, 2001)

Abstract : Even though there is a guideline for the required strength of pipe support in inspection, it does not mean the nominal strength which can be used for the form work design. And, Concrete Specification defines that the pipe support should be designed according to the steel design guidelines but the design details are not provided, such as buckling length and the sectional modulus, etc. For the better prediction of strength of pipe support, the slenderness ratio of support which reflects the boundary condition should be considered. In this paper, the elastic buckling formula based on the slenderness is derived. The formula contains the strength reduction factor that consider the strength deduction caused by initial lateral deformation and is 0.65 consistently regardless of boundary conditions. And the coefficient of effective buckling length is calculated from the experiment.
Key Words : pipe support, elastic buckling strength, effective slenderness, coefficient of buckling length, initial lateral displacement

1. 서 론

1.1. 연구 배경

현행 '가설기자재 성능 검정규격[1]'(이하, 검정규격)에서는 파이프 서포트의 지지길이를 4m 이하로 규정하고 있으나, 건설 현장에서 층고가 4m 이상이 되는 경우가 종종 발생하며, 이러한 경우에는 규격에 준한 사용이 지켜지지 않는 실정이다. 이와 같은 상황에서의 파이프 서포트의 내력을 확인하기 위한 실험을 기존 연구[2]에서 수행하였다.

검정규격에서는 평판재하시와 나이프 에지 시험시의 파이프 서포트의 소요 내력을 정의하고 있으나, 이는 거푸집 설계시 사용되는 허용내력을 결정하는 강도가 아니라 요구되는 최소 공칭 강도로 이해될 수 있다. 예를 들면, 평판재하시험의 내력은 최소 3,600 kgf 이상으로 규정하고 있다.

†To whom correspondence should be addressed.
leeyu@kunsan.ac.kr

또한, 국내[4]를 포함한 각국의 기준(3,7,8)에서는 강구조의 설계방법[5]에 따라 파이프 서포트를 설계할 수 있도록 규정하고 있다. 그러나 강구조 설계방법을 따르기 위한 세부사항에 대한 정의 및 정보가 없는 실정이다. 예를 들어, 기준에서는 파이프 서포트의 세장비가 200 이하가 되도록 규정하고 있으나, 파이프 서포트는 내관과 외관이 혼합 사용되므로 어느 단면을 적용하느냐에 따라 세장비에 20% 이상의 차이가 발생한다. 또한, 세장비는 부재 단부의 구속상태에 따라 큰 차이가 있다. 즉, 현장과 같이 받이판 위에 멍에를 설치하는 경우의 세장비는 실험실의 평판재하 시험의 것과는 상이할 것이 분명하다.

이외에도 초기 횡변위(내관과 외관을 연결핀으로 연결함으로 수직 설치시 발생하는 수평 횡변위) 및 연결핀의 영향, 부재의 전용회수와 손상정도는 파이프 서포트의 내력에 많은 영향을 미치므로 이에 대한 사항이 구체적으로 명시되어 설계를 위한 자료로 제시되어야 할 것이다.

1.2. 연구 목적과 범위

현재까지 파이프 서포트의 공칭강도 추정에 대하여 많은 연구가 수행되지 않았으며, 현장과 사용조건에 따른 내력 산정식도 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험결과에 대한 고찰을 통하여, 지지조건을 반영하는 파이프 서포트의 내력 추정식을 유도하고자 한다.

본 연구에서 내력의 추정시 사용되는 실험결과는 내력에 손상을 전혀 입지 않은 신품에 대한 것이다. 파이프 서포트는 전용회수 또는 손상의 정도에 따라 내력이 감소하는데 이 부분은 본 연구에서 제외한다.

2. 파이프 서포트 실험

2.1. 실험 시편

실험 시편에 대한 설명은 <Table 1>과 같다. 제조사는 3개사의 제품을 사용하였으며, 시편은 4m, 5m, 5.8m 3가지에 대하여 수행하였다. 실험방법은 크게 나이프에지 시험(N 모델)과 평판재하시험(P 모델)을 사용하였으며, 평판재하시 받이판에 멍에를 부착한 경우를 P-T 모델로 표시하였다. <Table 3>과 같이 각 7개 종류에 대하여 나이프에지 시험 35개, 평판재하시험 39개, 받이판에 멍에를 부착하고 평판재하시험한 것이 38개이다. 이 실험 시편 중 SV4와 HV5 두가지 부재종류는 본 연구에서 추가로 실험을 한 것이며, 나머지는 기존 연구(2)의 실험 데이타이다.

각 시편의 두께와 길이 등의 검정규격 치수를 <Table 2>에 정리하였다. <Table 2>의 보조지주를 KV4에 부착하여 부재길이가 5m인 경우를 KS5, 5.8m인 경우를 KS6 부재로 표기하였다.

2.2. 내력 실험결과

시편의 내력 실험 결과는 <Table 3>에 정리하였다. 4m 길이의 경우, 받이판에 동바리를 부착하고 수평연결재를 연결한 경우(KV4-P-TL)를 제외하고는 모든 시편의 강도는 검정규격에서 요구하는 최소값 3600 kgf에 미치지 못하였다. 또한 나이프 에지의 실험값은 검정규격의 요구강도에 비하여 KV4의 경우는 90%를 SV4는 93%로 나타났다.

5m 파이프 서포트의 나이프 에지 시험의 내력은 검정규격의 산정식인 522 kgf보다 약간 크게 나타났다. 평압시험인 경우의 내력은 약 1,500 kgf를 상회하는 것으로 나타나고 있다. <Table 3>에서 동일사이고 동일 길이의 KV5-P와 KS5-P의 내력을 비교하면 진폭이 증가할수록 내력이 감소함을 알 수 있다.

Table 1. Notation of specimens

manu-facturer	composition	length		loading method	testing method
K S H	V① S②	4(4m) 5(5m) 6(5.8m)	-	N③ P④	T⑤ TL⑥

① General pipe support composed of external and internal pipe
② A supplemental pipe attached into general pipe support for 5 or 6 m long support
③ Knife-edge loading test
④ Flat plate loading test
⑤ Timber stringer is laid on the top bearing plate
⑥ Timber stringer and lateral bracing is used

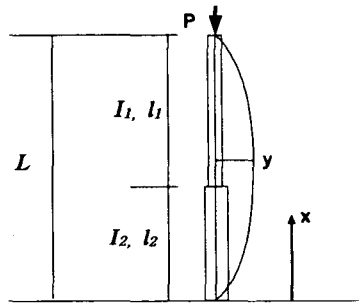

Fig. 1. Buckling mode when each end is hinge

Table 2. Inspection results of testing specimens Unit(mm)

types		KV4	KV5	KV6	SV4	HV5	supplemental pipe
total length		3995	5000	5800	4000	4936	1795
ext. pipe	length	1697	2197	2198	1703	2202	
	diameter	60.4	60.4	60.3	60.4	60.7	
	thickness	2.15	2.20	2.15	2.36	2.40	
int. pipe	diameter	48.5	48.5	48.4	48.6	48.6	48.5
	thickness	2.33	2.30	2.36	2.38	2.46	2.36
thk. of bearing plate		5.61	5.53	5.56	5.77	5.47	5.46

또한 받이판에 멍에를 부착한 P-T시편은 멍에를 부착하지 않은 P시편 보다 내력이 감소됨을 볼 수 있다. 5.8m 부재의 경우 내력이 더욱 감소됨을 볼 수 있으며, 전반적인 부재별의 내력특성은 5m의 경우와 동일하다.

3. 좌굴 이론식

3.1. 양단 단순지지의 좌굴하중

내관의 단면이차모멘트와 길이를 I_1, l_1, 외관의 단면이차모멘트와 길이를 I_2, l_2라 하고 전체의 길이를 L이라고 하자. 좌굴에 의하여 변형된 형상의 모습을 sin함수의 반파장과 같은 형태이므로 수평 변위 y를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$y = \delta \sin \pi \frac{x}{L} \qquad \text{(식 1)}$$

Table 3. Strength and swing amplitude of specimens

specimens		swing amp. (mm)	swing amp. length (%)	strength (kgf)	No. of specimens
KV4-(4m)	N	99	2.5	878	5
	P	96	2.4	3405	4
	P-T	98	2.5	2341	3
	P-TL	98	2.5	4179	3
SV4-(4m)	N	106	2.7	912	5
	P	93	2.3	3134	10
	P-T	99	2.5	2300	10
KV5-(5m)	N	112	2.2	560	5
	P	122	2.4	1709	5
	P-T	112	2.2	1363	5
HV5-(5m)	N	82	1.6	606	5
	P	103	2.1	1580	5
	P-T	99	2.0	1206	5
KS5-(5m)	N	56	1.1	569	5
	P	68	1.4	2194	5
	P-T	55	1.1	1602	5
KV6-(5.8m)	N	134	2.3	433	5
	P	94	1.6	1545	5
	P-T	80	1.4	1102	5
KS6-(5.8m)	N	190	3.3	383	5
	P	165	2.8	1239	5
	P-T	165	2.8	1132	5
rem.			mean=2.1		total 112

이때, 축력 P에 의한 모멘트 M은

$$M = Py = P\ \delta \sin \pi \frac{x}{L} \qquad \text{(식 2)}$$

이러한 가정에 따라 에너지 법을 이용하여 좌굴하중을 구하면 다음의 식과 같이 된다.

$$P_{cr}^{*} = \frac{\pi^2 E I_{eff}}{L^2} \qquad \text{(식 3)}$$

단, $I_{eff} = \frac{I_2}{A^*}$ 이며 내관과 외관의 혼합사용에 따른 유효 단면2차 모멘트라고 할 수 있다. 또한,

$$A^* = \frac{l_2}{L} + \frac{I_2}{I_1}\frac{l_1}{L} + \frac{1}{2\pi}\left(\frac{I_2}{I_1} - 1\right)\sin\frac{2\pi\, l_2}{L} \qquad \text{(식 4)}$$

파이프 서포트의 유효 단면적은 축하중 작용시 등가 강성에서 구할 수 있다. 내관의 단면적을 A_1, 외관의 단면적을 A_2라 하면, 유효단면적은 다음과 같이 된다.

$$A_{eff} = \frac{L\ A_1 A_2}{l_1 A_2 + l_2 A_1} \qquad \text{(식 5)}$$

(식 3)의 양변을 유효 단면적 A_{eff}로 나누면

$$\sigma_{cr}^{*} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_{eff}^2} \qquad \text{(식 6-1)}$$

단,

$$\lambda_{eff} = \frac{L}{\sqrt{I_{eff}/A_{eff}}} \qquad \text{(식 6-2)}$$

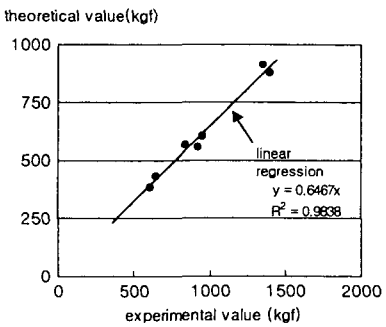

Fig. 2. Correlation of experiment with theory in knife-edge test

나이프 에지 실험, 즉 양단 단순지지 조건의 경우의 실험결과와 (식 3)과의 관계를 <Fig. 2>에 나타내었다. 그림의 실선은 직선 회귀분석을 한 것으로 원점을 통과하며, (식 3)의 값이 실험값의 65%를 나타내고 있다.

3.2. 초기 변위의 영향

<Fig. 2>에서 이론식의 값이 실험강도의 65%가 되는 주요 원인은 초기 횡변위라고 할 수 있다. 이 초기변위는 내관과 외관을 핀으로 연결하기 때문에 연결부위가 고정되지 않아 자연적으로 발생한다. 검정규격에서는 내관과 외관을 연결핀으로 연결하였을 때 상부의 진폭이 전체길이의 1/55 이하로 규정하고 있다. 본 실험의 측정에서도 <Table 3>과 같이 상당한 진폭이 있음을 알 수 있다.

양단 단순 지지된 부재에서 초기변위를 δ_0라 하고, 모멘트의 증가로 인한 추가 변위를 y_1이라 하자. 또한 전체 변위의 형상을 sin 반파장이라고 가정하면 임의의 거리 x에서 수평 변위 y는

$$y=(y_1+\delta_0)\sin\frac{\pi}{L}x \qquad \text{(식 7)}$$

라 할 수 있다. 이 가정에 따라 고전적인 방법(6)에 따라 초기변위에 의하여 모멘트가 증대되는 축력과 초기변형의 관계식은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{P}{P_e^*}+\frac{P}{M_p}\frac{\delta_0}{1-\alpha^*}=1 \qquad \text{(식 8)}$$

$$\alpha^*=\frac{P}{P_e^*} \qquad \text{(식 9-1)}$$

$$P_e^*=\frac{P_e}{C^*} \qquad \text{(식 9-2)}$$

$$P_e=\frac{EI_2\pi^2}{L^2} \qquad \text{(식 9-3)}$$

$$C^*=\pi\frac{l_2}{L}\frac{x}{L}\cos\pi\frac{l_1}{L}+\frac{x}{L}\sin\pi\frac{l_2}{L}+\frac{I_2}{I_1}\left(\sin\pi\frac{x}{L}-\pi\frac{l_2}{L}\frac{x}{L}\cos\pi\frac{l_1}{L}-\frac{x}{L}\sin\pi\frac{l_1}{L}\right) \qquad \text{(식 9-4)}$$

(식 8)은 초기변위에 의한 모멘트 $P\delta_0$가 추가 변위에 의하여 모멘트가 확대되며, 확대 계수는 $1/(1-\alpha^*)$임을 보여 주고 있다. (식 9-4)에서 최대 추가처짐이 중앙($x=L/2$)에서 발생한다고 가정하면 C^*는 (식 4)의 A^*와 거의 동일한 값을 나타내므로 C^* 대신에 (식 4)의 A^*를 사용하기로 한다.

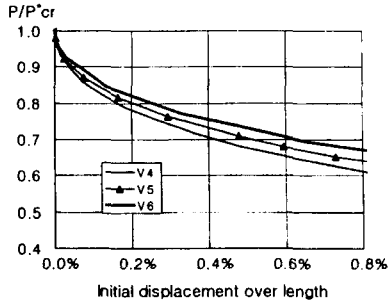

Fig. 3. Relationships of force ratio and initial displacement ratio

Fig. 3의 세로축은 좌굴하중에 대한 축력비(P/P_e^*), 가로축은 파이프 서포트의 길이에 대한 초기 변형비(δ_0/L)의 무차원 좌표로 설정하여 그 관계를 표시한 것이다.

초기변형은 부재를 설치되었을 때 양단을 잇는 직선으로부터의 중앙의 편심 거리이다. 이 초기변형은 부재를 설치할 때마다 변하므로 측정이 곤란하다. 검정규격에서 측정된 진폭은 이 초기변형과 밀접한 관계가 있다. 대략적으로, 진폭의 1/4이 중앙부위의 초기 처짐이라고 볼 수 있다. <Table 3>에서 측정된 진폭의 평균 값 2.1%을 4로 나누면, 중앙 지점의 예상 초기변형이 약 0.5%임을 알 수 있다.

<Fig. 3>에서 초기 변형비가 0.5%의 경우, 내력의 감소비가 부재에 따라 다르지만 평균적으로 0.7정도 됨을 알 수 있다. 이론식에서는 동일 초기변형에서 부재의 길이가 길수록 축력의 감소비가 작게 나타나고 있으나, 실험에서 고찰된 감소비 0.65와 잘 일치한다고 할 수 있다.

4. 이론식과 실험 결과

4.1. 이론식의 유도

앞의 결과를 이용하여, 일반적인 경우의 파이프 서포트의 좌굴강도 좌굴강도 P_{cr}은 (식 3)에 강도 감소계수 α를 곱하고, 좌굴길이 L 대신에 유효 좌굴길이 KL로 치환하여 표시할 수 있다.

$$P_{cr}=\alpha\frac{\pi^2EI_{eff}}{(KL)^2} \qquad \text{(식 10)}$$

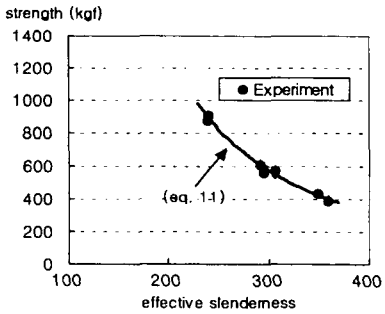

Fig. 4. Comparison of proposed equation with experiment for knife-edge test

여기서 강도저감계수 α는 초기변형에 의한 강도의 저하값이며, 앞의 실험결과로부터 양단 지지의 경우 0.65이다. K는 유효좌굴길이 계수로 양단이 자유단인 경우 1이다.

또는 (식 6-2)의 유효 세장비를 사용하여 (식 10)을 표시하면

$$P_{cr}=\alpha\frac{\pi^2 E}{\lambda_{eff}^2}A_{eff} \qquad \text{(식 11-1)}$$

단,

$$\lambda_{eff}=\frac{KL}{\sqrt{I_{eff}/A_{eff}}} \qquad \text{(식 11-2)}$$

<Fig. 4>는 나이프에지 실험결과와 (식 11)을 비교한 것이다. 나이프에지 시험은 양단이 단순지지된 경우이므로 $K=1$을 사용하였다. (식 11)이 실험과 매우 잘 일치함으로, 사용된 유효 단면이차모멘트 I_{eff}가 적절함을 알 수 있다.

4.2. 유효좌굴계수의 산정

나이프 에지 시험의 경우에 비하여 평판 재하실험의 유효 좌굴길이는 감소한다. 양단이 완전 고정인 경우 유효 좌굴길이 계수 K는 0.5이다. 평판재하 실험에서는 상부의 받이판과 하부의 바닥판이 지지점과 접촉되어 고정이되나 완전 고정은 될 수 없다. 따라서 이러한 경우의 유효좌굴계수를 구하기 위하여 (식 10)을 이용하기로 한다. (식 10)에서 P_{cr}을 실험 결과치 P_{exp}로 치환하고 (식 3)을 이용하면 유효 좌굴길이 계수는 다음과 같다.

$$K=\sqrt{\frac{\alpha P_{cr}^*}{P_{exp}}} \qquad \text{(식 12)}$$

Table 4. Coefficient of effective buckling length, K

specimen	P type	P-T type
KV4	0.53	0.64
SV4	0.55	0.64
KV5	0.61	0.68
HV5	0.64	0.73
KS5	0.51	0.60
KV6	0.53	0.63
KS6	0.58	0.60
mean	0.57	0.65

(식 12)에 따라 K를 구하기 위하여서는 α의 값이 필요한데, 양단 힌지의 경우에 사용하였던 값 0.65를 사용하였다. 왜냐하면 유효 좌굴길이를 사용한다는 것은 양단을 힌지로 간주할 수 있는 경우에 대한 양단 힌지 사이의 내부 길이를 의미하기 때문이다. 따라서 α는 변함없이 0.65라고 가정하였다. 이에 따라 계산된 K를 <Table 4>에 정리하였다. 부재에 따라 다소 편차를 보이지만, 본 연구에서는 7개 시편의 평균값을 취하였다. 즉, 평판재하시험에서는 0.57, 현장과 같이 멍에가 받이판 위에 놓이는 경우는 0.65로 계산되었다.

4.3. 실험결과와의 비교

앞에서 유도된 (식 11)과 <Table 3>의 실험결과를 비교하였다. 이때 K는 <Table 4>의 결과를, 강도 감소계수 α=0.65를 사용하였다. <Fig. 5>는 평판재하 실험의 경우로 유효세장비가 130에서 200 사이에서 이론식과 어느 정도 편차를 보이고 있으나 전반적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. <Fig. 6>는 받이판 위에 멍에를 놓고 평판재하 시험을 수행한 경우로 제안식과 잘 일치함을 볼 수 있다.

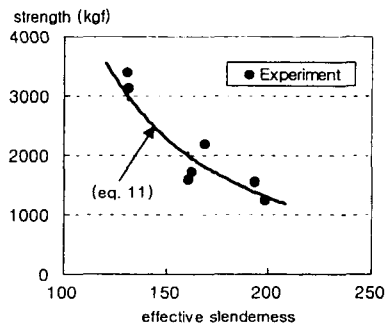

Fig. 5. Comparison of proposed equation with experiment for flat-plate test (P type)

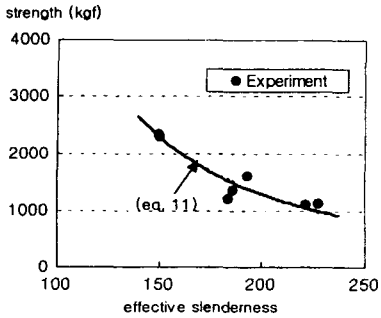

Fig. 6. Comparison of proposed equation with experiment for flat-plate test with stringer on top bearing plate (P-T type)

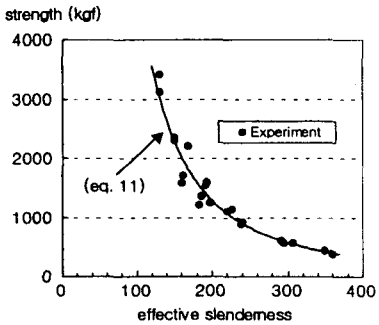

Fig. 7. Comparison of proposed equation with full experimental results

본 연구의 모든 실험 결과를 유효세장비와 강도와의 관계로서 <Fig. 7>에 표시하였다. 그림과 같이, 내력 추정식 (식 11)과 실험결과는 잘 일치함을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 선택한 유효 좌굴길이계수, 강도저감 계수 및 유효 단면 2차 모멘트가 적절함을 알 수 있다. (식 11)은 부재의 길이나 지지조건과 관계없이, 세장비에 의하여 파이프 서포트의 내력이 일관성있게 표현되는 장점이 있다. 세장비는 (식 11-2)과 같이 계산되며, K는 <Table 3>과 같이 실험에 근거한 값이다. 또한 강도저감계수 α=0.65로 단부의 지지조건과 상관없는 계수이다.

5. 결 론

고전적인 이론을 이용하여 양단 힌지의 경우에 파이프 서포트의 탄성좌굴 강도의 이론식를 구한 후 실험결과와 비교한 결과, 실험결과치는 탄성 좌굴강도식의 약 65%임을 알 수 있었다. 이론식과의 비교를 통하여 이에 대한 주요 원인이 파이프 서포트의 초기 횡변위임을 검증하였다.

이를 근거로 하여 일반적인 경우의 파이프 서포트의 좌굴강도 좌굴강도 P_{cr}을 다음과 같이 제안하였다.

$$P_{cr} = \alpha \frac{\pi^2 E I_{eff}}{(KL)^2} \qquad \text{(식 10)}$$

여기서, 초기 변위에 의한 내력의 감소계수 α는 단부의 지지조건에 상관없이 일정한 값 0.65라고 가정하였다. 단부의 조건을 반영하는 유효좌굴 계수 K는 실험의 결과로부터 다음과 같이 계산되었다. 평판재하시험에서 멍에가 없는 경우 0.56, 현장과 같이 받이판 위에 멍에가 놓인 경우는 0.65이었다. I_{eff}는 이론식에 의하여 얻어진 유효 단면2차 모멘트이다.

본 연구의 제안식은 단부의 조건과 상관없이 실험의 결과와 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다. 본 연구의 결과는 이전까지 지지조건에 따라 고려할 수 없었던 파이프 서포트의 내력을 단지 K값을 치환하므로 내력을 추정할 수 있다. 예를 들어, 현장과 같이 받이판 위에 멍에가 설치되는 경우, 유효좌굴계수 0.65를 사용하여 파이프 서포트 내력을 추정할 수 있다.

본 연구에서 유도한 추정식은 본 연구자의 제한된 실험 데이터에서만 수행되었으므로, 좀더 신뢰성을 구축하기 위하여서는 많은 데이터를 통하여 유효좌굴길이 계수 및 강도저감계수에 대한 보완이 필요하다. 또한, 좀더 정확한 현장에서의 내력 강도를 추정하기 위하여서는, 중고품에 대한 실험적인 연구도 필요하다.

참고문헌

1) 가설기자재 검정규격, 노동부.
2) 이영욱, 안홍섭, 최순주 "Strength of Pipe Support Over 4m", 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 5, 1999. 12. pp. 108~111.
3) 쌍용건설기술연구소, 거푸집설계 및 시공지침안, 1994. 2.
4) 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 1999.
5) 강구조계산규준 및 해설, 대한건축학회, 1983.
6) C. G. Salmon and J. E. Johnson, Steel Structures, Harpers & Collins, 4th Ed., 1996.
7) Code of Practice for Falsework, BS 5975, 1996.
8) Formwork for Concrete, Hurd, M. K., 1992.