

# 유선형 완화공의 수리계산예

## Example on Hydraulic Design of Streamlined Warp Transition

신 동 수\* 류 기 송\*\*  
Dong Soo Shin Ki Song Ryu

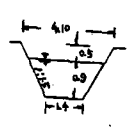
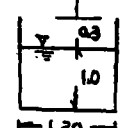
### I. 서 론

일반적으로 수로의 기울기가 완만할 때는 수로구조물접속부의 수두손실을 적게하기 위하여 개수로의 접속부는 콘크리트로 만들고 그 단면은 점차 축소하거나 확대하는 단면으로 하며 또한 밑바닥높이의 변화도 서서히 변화하는 곡선이 되도록 해야 하는데 여기서는 수두손실이 가장적인 유선형완화공을 계산예로서 소개하기로 한다.

### II. 계산 조건

상하류수로(토공) 및 물다리(가통)의 수리조건은 다음과 같다.

표-1. 유량 계산 표

구 분	상 류	물다리(가통)	하 류
단 면			상 류 와 같 다
A(m <sup>2</sup> )	2.475	1.200	"
V(m/sec)	0.585	1.207	"
h <sub>v</sub> (m)	0.0175	0.0743	"
R	0.532	0.375	"
n	0.025	0.015	"
I	0.00050	0.00121	"
Q(m <sup>3</sup> /sec)	1.448	1.448	"
L(m)	—	20	—

\* 농업진흥공사

\*\* 농업진흥공사

### III. 완화공의 길이

완화공 상하류 접속수로의 수면나비를 연결한 직선이 수로중심선과 만나는 각을 12°30'~25°가 되도록 완화공 길이를 취한다.

#### 1. 입구완화공

$$l = \frac{B_1 - B_2}{2} \cot \theta = \frac{4.10 - 1.20}{2} \cot 13^\circ = 6.27 \approx 6.00(\text{m})$$

여기서  $l$  = 완화공길이(m)

$B_1$  = 완화공상류수로의 수면나비(m)

$B_2$  = 완화공하류수로(물다리)의 수면나비(m)

$\theta$  = 완화공 상하류 접속수로의 수면나비를 연결한 직선과 수로중심선 사이의 각

#### 2. 출구 완화공

입구완화공과 같은 방법으로 계산한다. 여기서는 입구완화공 길이와 같게 완화공 길이를 6.0m로 한다.

### IV. 수면곡선

수면곡선은 완화공의 중간점에서 반곡되는 포물선으로 가정하여 계산하며 이 중간점에서  $\frac{F}{2}$ 의 수면저하가 있는 것으로 보고 수면곡선을 구한다.

#### 1. 입구완화공

입구완화공의 손실수두를  $0.1\Delta h_v$ 라 하면 수면낙차  $F$ 는

$$F = 1.1\Delta h_v = 1.1(hv_1 - hv_2) = 1.1(0.0743 - 0.0175) = 0.0625(\text{m})$$

여기서  $hv_1$  = 완화공상류수로 유속수두(m)

$hv_2$  = 완화공하류수로 유속수두(m)

완화공을 10등분하여 그 중간 3m지점에서 반곡하는 포물선으로 하여 수면곡선을 구하던 표-2와

같다.

$$a = \frac{2F}{l^2} = \frac{2 \times 0.0625}{6^2} = 0.00347$$

$$y = ax^2 = 0.00347x^2$$

여기서  $y$  = 환화공시점으로부터  $x$  거리되는 점의 수면저하량(m)

$x$  = 환화공시점으로부터의 거리(m)

표-2. 환화공 각 단면의 수면저하량

$x(m)$	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0
$x^2$	0.36	1.44	3.24	5.76	9.00	12.96	17.64	23.04	29.16	36.00
$y(m)$	0.0012	0.0050	0.0112	0.0200	0.0312	0.0425 -0.0200 =0.0425	0.0625 -0.0112 =0.0513	0.0625 -0.0050 =0.0575	0.0625 -0.0012 =0.0613	0.0625 0 =0.0625

2. 출구 환화공

출구환화공의 손실수두를  $0.2\Delta hv$  라고 하면 수면

낙차  $F$  는

$$F = 0.8\Delta hv = 0.8(hv_2 - hv_0)$$

$$= 0.8(0.0743 - 0.0175) = 0.0454(m)$$

입구환화공과 같이 수면저하곡선을 구하면 표-3 과 같다.

$$a = \frac{2F}{l^2} = \frac{2 \times 0.0454}{6^2} = 0.00252$$

$$y = ax^2 = 0.00252x^2$$

표-3. 환화공 각 단면의 수면저하량

$x(m)$	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0
$x^2$	0.36	1.44	3.24	5.76	9.00	12.96	17.64	23.04	29.16	36.00
$y(m)$	0.0009	0.0036	0.0081	0.0145	0.0226	0.0454 -0.0145 =0.0309	0.0454 -0.0081 =0.0373	0.0454 -0.0036 =0.0418	0.0454 -0.0009 =0.0445	0.0454 0 =0.0454

V. 계산순서

① 표-2, 표-3에서 구해진 수면저하량을 10 등분한 각 단면과 환화공 시점을 구분하여 기입한다.

② 수면저하량을 입구환화공 계산시는 1.1로 출구 환화공 계산시는 0.8로 나누어 마찰손실 이외의 손실을 고려한 각 단면의 유속수두차  $\Delta hv$ 를 계산한다.

③ 입구환화공에서는 ②항의  $\Delta hv$ 에 환화공 상류 수로의 유속수두를 더하여 각 단면의 유속수두를 구하며 출구환화공에서는 환화공 상류수로의 유속수두에서 항의  $\Delta hv$ 를 빼어 각 단면의 유속수두를 구한다.

④ ③항의 유속수두에 의하여 각 단면의 유속을 구한다.

⑤ ④항의 유속으로 계획유량을 나누어 통수단면

적을 구한다.

⑥ ①항을 구하는 방법과 같이 수면나비의 변화를 포물선으로 보고 환화공수면나비를 가정한다.

$$F_1 = \frac{B_1 - B_2}{2} = \frac{4.10 - 1.20}{2} = 1.45(m)$$

$$a = \frac{2F}{l^2} = \frac{2 \times 1.45}{6^2} = 0.0805$$

$$y = ax^2 = 0.0805x^2$$

여기서

$F_1$  = 2 등분한 환화공상하류수로 수면나비차(m)

$x$  = 환화공시(중)점으로부터의 거리(m)

$y$  = 환화공시(중)점으로부터  $x$  거리되는 점의 수면나비 변화량(m)

$B_1, B_2$  = 환화공 상하류수로의 수면나비(m)

$l$  = 환화공의 길이(m)

표-4. 가정 수면 나비

$x(m)$	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0
$x^2$	0	0.36	1.44	3.24	5.76	9.00	12.96	17.64	23.04	29.16	36.00
$y(m)$	0	0.029	0.116	0.291	0.464	0.725	1.450 -0.464 =0.986	1.450 -0.261 =1.189	1.450 -0.116 =1.334	1.450 -0.029 =1.421	1.450 0 =1.450
$(\frac{B_2}{2} + y)(m)$	0.600	0.629	0.716	0.861	1.064	1.325	1.586	1.789	1.934	2.021	2.050

입구 및 환화공 상하류수로의 단면이 같으므로 입구와 출구의 가정수면나비를 같게 한다.

⑦ ⑥항과 같은 방법으로 환화공의 가정수로바닥나비를 구한다.

$$F_2 = \frac{T_1 - T_2}{2} = \frac{1.40 - 1.20}{2} = 0.10(m)$$

$$a = \frac{2F}{h^3} = \frac{2 \times 0.10}{6^3} = \frac{0.20}{36} = 0.00555$$

$$y = ax^2 = 0.00555x^2$$

여기서

$F_2$  = 2 등분한 환화공상하류수로의 바닥 나비차 (m)

$x$  = 환화공시(중)점에서 부터의 거리(m)

$y$  = 환화공시(중)점에서 부터  $x$ 거리되는 점의 환화공바닥나비의 변화량(m)

$T_1, T_2$  = 환화공상하류수로의 수로바닥나비(m)

⑧ ⑥항과 ⑦항을 더하여 평균나비를 구한다.

표-5. 가정 바닥 나비

$x(m)$	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0
$x^2$	0	0.36	1.44	3.24	5.76	9.00	12.96	17.64	23.04	29.16	36.00
$y(m)$	0	0.002	0.008	0.018	0.032	0.050	0.100 -0.032 =0.068	0.100 -0.018 =0.082	0.100 -0.008 =0.092	0.100 -0.002 =0.098	0.100 0 =0.100
$(\frac{T_2}{2} + y)(m)$	0.600	0.602	0.608	0.618	0.632	0.650	0.668	0.682	0.692	0.698	0.700

④ ⑤항의 단면적을 ⑧항의 평균나비로 나누어 수심을 구한다. 여기서 수심은 중간에서 알아졌다가 하류에서 깊어진다. 고로 환화공시중점의 수심차를 균등분배하여 각단면의 수심을 수정한다.

⑧항의 수정

④항에서 수정한 수심으로 ⑤항의 단면적을 나누어 각단면의 평균나비를 수정한다.

⑥, ⑦항의 수정

⑧항의 가정치와 수정한 결정치의 차를 2 등분하여 그 증감에 따라 ⑥, ⑦항의 가정치에 증감시켜 수정한다.

또는 가정한 환화공바닥나비를 결정치로 하고 ⑥항의 가정치와 수정한 결정치의 차를 ⑥항에서 증감시킨다.

⑩ 각단면의 2 등분한 수면나비에서 2 등분한 수로바닥나비를 빼어 수심에 대한 축벽의 수평거리를 구한다.

⑪ 수정한 수로바닥나비에 물과 접하는 환화공측벽비탈길이의 2배를 더하여 윤변을 구하고 이윤변으로 ⑤항의 단면적을 나누어 동수반지름을 구한다

$$R = \frac{A}{T + 2\sqrt{(\frac{B-T}{2})^2 + h^2}}$$

여기서  $R$  = 동수반지름

$A$  = 단면적( $m^2$ )

$T$  = 환화공바닥나비(m)

$B$  = 환화공수면나비(m)

$h$  = 수심(m)

⑬ 맨닝(Manning Eq.) 공식에 의하여 각단면의 수

면기울기를 구한다.

$$I = \left( \frac{nV}{R^{2/3}} \right)^2$$

여기서  $I$  = 수면기울기

$n$  = 조도계수(0.015)

$V$  = 유속(m/sec)

$R$  = 동수반지름

⑭ 전후양단면의 평균수면기울기에 구간거리를 곱하여 마찰손실수두를 구한다.

$$h_f = \frac{I m + I n}{2} \times l$$

여기서  $h_f$  = 마찰손실수두(m)

$I m, I n$  = 10 등분한 환화공전후단면의 수면기울기

$l$  = 10 등분한 환화공단면의 구간거리(m)

⑮ 각단면의 마찰손실수두를 추가한다.

⑯ 입구환화공시점의 수면고가 +15.000 일때 각단면의 수면고를 계산하기로 한다. 그 계산방법은 입구환화공일때 (환화공시점수면고) -  $\Delta W_s$  -  $\Sigma h_f$  로 출구환화공일 때 (환화공시점수면고) +  $\Delta W_s$  -  $\Sigma h_f$  로 하여 수면고를 정한다.

출구환화공시점의 수면고는 물다리(가통)의 마찰손실을 고려하여 계산한다.

물다리의 마찰손실

$$h_f = I \cdot L = 0.00121 \times 20 = 0.024(m)$$

$h_f$  = 물다리의 마찰손실(m)

$I$  = 물다리의 수면기울기

$L$  = 물다리의 길이(m)

출구환화공시점의 수면고 = (입구환화공중점의

수면고)-(물다리의 마찰손실)=14.933-0.024  
=14.909(m)

⑬ ⑮항의 수면고에서 ⑨항의 수정한 수심을 빼  
어 완화공바닥표고를 구한다.

⑰ ⑨항의 수심으로 ⑩항을 나누어 측벽의 기울  
기를 구한다.

⑮ 완화공시종점의 수로단면에 따라 측벽높이를  
정한다.

⑰ ⑱항과 ⑬항을 곱하여 측벽의 수평거리를 구  
한다.

위의 계산순서에 따라 입구및 출구완화공을 계산  
한 결과는 표 6, 표 7을 참조.

표-6. 입 구 완 화 공 계 산 표

x(m)		0	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00	3.60	4.20	4.80	5.40	6.00	비고
계산순서													
① 수면저하	$\Delta W_s$	0	0.0012	0.0050	0.0112	0.0200	0.0312	0.0425	0.0513	0.0575	0.0613	0.0625	
② 유속수두	$\Delta h_v = \frac{\Delta W_s}{1.1}$	0	0.0011	0.0045	0.0102	0.0182	0.0284	0.0386	0.0466	0.0523	0.0557	0.0568	
③ 유속수두	$h_v = \frac{\Delta h_v}{+0.0175}$	0.0175	0.0186	0.0220	0.0277	0.0357	0.0459	0.0561	0.0641	0.0698	0.0732	0.0743	
④ 유 속	$V = \sqrt{2ghv}$	0.585	0.604	0.657	0.737	0.836	0.948	1.048	1.121	1.170	1.198	1.207	
⑤ 단 면 적	$A = \frac{Q}{V}$	2.475	2.397	2.204	1.965	1.732	1.527	1.382	1.292	1.238	1.209	1.200	
⑥ 수면나비	$\frac{B}{2}$	2.050	1.936	1.703	1.430	1.174	0.957	0.807	0.713	0.655	0.619	0.600	결정 가정
		2.050	2.021	1.934	1.789	1.586	1.325	1.064	0.861	0.716	0.629	0.600	
⑦ 바닥나비	$\frac{T}{2}$	0.700	0.698	0.692	0.682	0.668	0.650	0.632	0.618	0.608	0.602	0.600	결정
⑧ 평균나비	$\frac{B+T}{2}$	2.750	2.634	2.395	2.112	1.842	1.607	1.439	1.331	1.263	1.221	1.200	결정 가정
		2.750	2.719	2.626	2.471	2.254	1.975	1.696	1.479	1.324	1.231	1.200	
⑨ 수 심	$h = \frac{2A}{(B+T)}$	0.900	0.910	0.920	0.930	0.940	0.950	0.960	0.970	0.980	0.990	1.000	결정 가정
		0.900	0.881	0.839	0.795	0.768	0.773	0.814	0.873	0.935	0.982	1.000	
⑩ 물과 접하 는 측벽면의 수평거리	$\frac{B-T}{2}$	1.350	1.238	1.011	0.748	0.506	0.307	0.175	0.095	0.047	0.017	--	결정
⑪ 동수반저름	R	0.532	0.536	0.535	0.524	0.499	0.463	0.430	0.406	0.390	0.380	0.375	
⑫ 수면기울기	I	0.000 18	0.000 19	0.000 22	0.000 29	0.000 40	0.000 56	0.000 76	0.000 94	0.001 08	0.001 17	0.001 21	
⑬ 마찰손실 수두	$h_f$	--	0.000 11	0.000 12	0.000 15	0.000 21	0.000 29	0.000 40	0.000 51	0.000 61	0.000 68	0.000 71	
⑭ 누가마찰 손실수두	$\Sigma h_f$	--	0.0001	0.0002	0.0004	0.0006	0.0009	0.0013	0.0018	0.0024	0.0031	0.0038	
⑮ 수 면 고	$\frac{15.000 - \Delta W_s - \Sigma h_f}{}$	15.000	14.999	14.995	1.4988	14.979	14.967	14.956	14.946	14.940	14.935	14.933	
⑯ 바닥표고	$\frac{(\text{수면고}) - (\text{수심})}{}$	14.100	14.089	14.075	14.058	14.039	14.017	13.996	13.976	13.960	13.945	13.933	
⑰ 측벽기울기	수직 : 수평 1 : n	1.500	1.360	1.099	0.804	0.538	0.323	0.182	0.098	0.048	0.017	--	
⑱ 측 벽 고	H	1.400	1.390	1.380	1.370	1.360	1.350	1.340	1.330	1.320	1.310	1.300	
⑲ 측벽의 수 평거리	nH	2.100	1.890	1.517	1.101	0.732	0.436	0.244	0.130	0.063	0.022	--	

표-7. 출구완화공 계산표

계산순서		$x(m)$											비고
		0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	
① 수면저하	$\Delta Ws$	0	0.0009	0.0036	0.0081	0.0145	0.0226	0.0309	0.0373	0.0418	0.0445	0.0454	
② 유속수두차	$\Delta hv = \frac{\Delta Ws}{0.8}$	0	0.0011	0.0045	0.0101	0.0181	0.0284	0.0386	0.0466	0.0523	0.0557	0.0568	
③ 유속수두	$hv = \frac{0.0743}{-\Delta hv}$	0.0743	0.0732	0.0698	0.0642	0.0562	0.0459	0.0357	0.0277	0.0220	0.0186	0.0175	
④ 유속	$V = \sqrt{2g hv}$	1.207	1.198	1.170	1.121	1.048	0.948	0.836	0.737	0.657	0.604	0.585	
⑤ 단면적	$A = \frac{Q}{V}$	1.200	1.209	1.238	1.292	1.382	1.527	1.732	1.965	2.204	2.397	2.475	
⑥ 수면나비	$\frac{B}{2}$	0.600 0.600	0.619 0.629	0.655 0.716	0.713 0.861	0.807 1.064	0.957 1.325	1.174 1.586	1.430 1.789	1.703 1.934	1.936 2.021	2.050 2.050	결정 가정
⑦ 바닥나비	$\frac{T}{2}$	0.600	0.602	0.608	0.618	0.632	0.650	0.668	0.682	0.692	0.698	0.700	결정
⑧ 평균나비	$\frac{B+T}{2}$	1.200 1.200	1.221 1.231	1.263 1.324	1.331 1.479	1.439 1.696	1.607 1.975	1.842 2.254	2.112 2.471	2.395 2.626	2.634 2.719	2.750 2.750	결정 가정
⑨ 수심	$h = \frac{2A}{(B+T)}$	1.000 1.000	0.990 0.982	0.980 0.935	0.970 0.872	0.960 0.813	0.940 0.772	0.940 0.767	0.930 0.755	0.795 0.840	0.910 0.880	0.900 0.900	결정 가정
⑩ 물과 접하는 측벽면의 수평거리	$\frac{B-T}{2}$	—	0.017	0.047	0.095	0.175	0.307	0.506	0.748	1.011	1.238	1.350	
⑪ 동수반지름	$R$	0.375	0.380	0.390	0.406	0.430	0.463	0.499	0.524	0.535	0.536	0.532	
⑫ 수면기울기	$I$	0.001 21	0.001 17	0.001 08	0.000 94	0.000 74	0.000 56	0.000 40	0.000 29	0.000 22	0.000 19	0.000 18	
⑬ 마찰손실 수두	$h_f$	—	0.000 71	0.000 67	0.000 61	0.000 50	0.000 39	0.000 29	0.000 21	0.000 15	0.000 12	0.000 11	
⑭ 누가마찰 손실수두	$\Sigma h_f$	—	0.0007	0.0014	0.0020	0.0025	0.0029	0.0032	0.0034	0.0035	0.0037	0.0038	
⑮ 수면고	$\frac{14909 + \Delta Ws - \Sigma h_f}{2}$	19.909	14.909	14.911	14.915	14.921	14.928	14.936	14.942	14.947	14.949	14.950	
⑯ 바닥표고	(수면고) — (수심)	1.3909	13.919	13.931	13.945	13.961	13.978	13.996	14.012	14.027	14.039	14.050	
⑰ 측벽기울기	수직 : 수평 1 : n	—	0.017	0.048	0.098	0.182	0.323	0.538	0.804	1.099	1.360	1.500	
⑱ 측벽고	$H$	1.300	1.310	1.320	1.330	1.340	1.350	1.360	1.370	1.380	1.390	1.400	
⑲ 측벽의 수 평거리	$nH$	—	0.022	0.063	0.130	0.244	0.436	0.732	1.101	1.517	1.890	2.100	



**Ⅶ. 수면고의 비교계산**

참고로 완화공을 10등분을 하지않고 표-1에 따라 손실수두를 계산하여 수면고와 바닥표고를 먼저 계산한것과 비교하면 다음과 같다.

손실수두계산

**1. 입구 완화공**

$$\text{마찰} : \frac{I_1 + I_2}{2} \times l = \frac{0.00050 + 0.00121}{2} \times 6 = 0.00513$$

$$\text{단면축소} : f_1(hv_1 - hv_2) = 0.1(0.0743 - 0.0175) = 0.00568$$

표-8.

수로 바닥표고 및 수면고 계산표

구분	단면	연장	손실수두	에너지선표고	유속수두	수면고	수심	수로바닥표고
입구완화공 시		m	m	15.018 m	0.018 m	(15.000) 15.000 m	m	(14.100) 14.100 m
	완화공	6	0.011					
입구완화공 중				15.007	0.074	(14.933) 14.933	1.000	(13.933) 13.933
	물다리	20	0.024					
출구완화공 시				14.983	0.074	(14.909) 14.909	1.000	(13.909) 13.909
	완화공	6	0.016					
출구완화공 중				14.967	0.018	(14.950) 14.949	0.900	(14.050) 14.049

( )내의 숫자는 완화공을 10등분하여 수로바닥고및 수면고를 계산한 결과치이다.

계 0.0108m

**2. 물다리(가통)**

마찰 :  $I \cdot L = 0.00121 \times 20 = 0.0242m$

**3. 출구완화공**

마찰 :  $\frac{I_1 + I_2}{2} \times l = \frac{0.00121 + 0.00050}{2} \times 6 = 0.00513$

단면축소 :  $f_2(hv_1 - hv_2) = 0.2(0.0743 - 0.0175) = 0.01037$

계 0.0155m

**4. 손실수두 합계**

$\Sigma \Delta h = 0.0108 + 0.0242 + 0.0155 = 0.0505m$