

수리모형실험에 의한 경사식 방파제에서의 전사면 및 저면파압특성 고찰

Wave Pressure Characteristic of Front Slope and Bed in Rubble Mound Breakwaters by Hydraulic Model

조휴상*, 편종근**, 김규한***

Hyu Sang Cho, Chong Kun Pyun, Kyu Han Kim

요 지

경사식 방파제에 대하여 수리모형실험을 통하여 방파제의 전사면과 저면에 작용하는 파압을 직접 측정하여 파압의 공간적 분포를 파악하여 보았다. 실험의 결과는 기존의 경사식 방파제에 대하여 파압에 대한 연구는 거의 없기 때문에 Goda(1988, 2002)가 제시한 전사면에 대한 이론식과 비교하여 보았다. 실험은 특정적으로 제시된 방파제 단면에 대한 실험이 아니고, 가상적인 단면을 선정 후 파랑 및 수심 등의 제조조건을 감안하여 파형경사를 결정하고, 이에 맞는 파고와 주기를 산정한 후 제반 해안수리학적 특성중 반사율과 처음높이, 사면 및 저면에 작용하는 파압을 직접 측정하여 보았다. 실험결과 전사면에서의 파압 분포는 Goda의 이론식과 경향은 비슷하나 크기는 차이가 나 이에 대한 보정은 필요한 것으로 나타났으며, 저면에서의 파압도 측정이 되었지만 이것이 지반지지력에 어떠한 영향을 미치는지는 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 경사식 방파제, 전사면 파압, 저면파압, 수리모형실험

1. 서 론

방파제는 항만 및 어항 시설물을 보호하기 위한 가장 중요한 외곽 시설물이며, 그 구조 형식에 따라 직립식, 경사식, 혼성식, 기타 특수형식으로 구분되어 진다. 이중 경사식 방파제는 사석 및 피복재의 구입이 용이한 경우 시공성 및 보수면에 있어서 타 형식보다 유리하다는 장점 때문에 현재까지 많이 채택되어 시공되고 있는 상황이다. 그러나 경사식 방파제는 기하학적 특성으로 인하여 수심이 깊은 곳에서는 공사비가 기하학적으로 증가하며 또한 연약지반에 시공되는 경우에는 지반과의 상호작용으로 침하 및 활동파괴가 발생하는 등 많은 문제점도 가지고 있다. 그러므로 경사식 방파제가 심하게 피해를 입었을 때의 복구비는 방파제를 신설하는 비용만큼 소요되는 경향이 있다. 경사제의 파괴를 일으키는 양상은 여러 가지가 있지만 이중 가장 큰 피해양상은 피복층 또는 지반 붕괴가 발생하는 경우이다. 경사식 방파제의 설계시 주 외력은 파랑, 조석, 지진력등이 작용하며, 이러한 외력에 대항하기 위하여 경사제의 피복재의 안정성, 원호활동, 지반지지력에 대한 검토등이 필요하다. 이중 지반지지력을 제외한 검토사항들은 나름대로 설계에 반영되고 있으나, 파랑과 지반지지력에 관한 연구 및 검토는 거의 이루어지지 않고 있는 상황이다. 이는 파랑 및 조석에 대하여 제체저면에 작용하는 압력에 대한 연구 결과가 전세계적으로 거의 전무하기 때문인 것으로 사료된다. 그 이유로는 경사제의 형상이 틀려지면 형상에 따라 저면에 전달되는 파압의 크기도 달라지기 때문에 정식화한 수식을 설정하기가 어렵기 때문인 것으로 판단되어진다. 본 연구는 위와 같은 경사식 방파제에 작용하는 파압중 전사면과 저면에서의 파압을 수리모형실험을 통하여 직접 측정하여 파압의 공간분포를 파악하였으며, 실험치와의 비교를 위하여 기존에 Goda가 제안한 전사면에 관한 파압식들(Goda, 1988, 2001)과 비교하여 보았다.

* 정희원, 명지대학교 토목공학과 박사과정, E-mail : h.s.cho@mju.ac.kr

** 정희원, 명지대학교 토목공학과 교수, E-mail : ckpyun@mju.ac.kr

*** 정희원, 관동대학교 SOC공학부 교수, E-mail : kdmul@chol.com

2. 수리모형실험

2.1 실험시설

본 실험에 사용된 조파기는 스펙트럼 함수에 의한 불규칙파와 주어진 파고와 주기에 대응하는 규칙파를 조파할 수 있으며, 단면수조는 파고계와 파압계, 유속계 등을 연결하여 동시에 16채널의 자료를 얻을 수 있다. 사용된 단면수조의 제원 및 기능을 요약하면 table 1과 같다. 반사율등과 같은 수위의 측정에는 용량식 파고계를 사용하였으며, 파압의 측정에 사용된 파압계는 측정범위가 최대 0.1kg/cm^2 로서 미세한 압력의 변동까지 측정할 수 있다.

표 1. 조파수조 및 조파기 특성

구 분		실험 시설 및 장비	비 고
수 조 제 원		30m(길이) × 0.7m(폭) × 1.4m(높이)	
조파기 성 능	조파판 크기	0.695m(폭) × 1.2m(높이)	
	최대파고	0.3m	
	재현주기	0.3 ~ 3.0sec	
	최대수심	1.1m	
	구동방법	전기 서보 피스톤식	

조파기의 구동을 위한 프로그램은 일본 NTC에서 제작한 프로그램을 사용하였으며, 규칙파 및 불규칙파 모두 생성 가능하다. 또한 파고계로부터 독취된 자료를 스펙트럼 및 파고 등으로 분석도 가능하며 전반적으로 본 시스템은 실험과 제원에 따른 조파신호를 생성하고, 생성된 신호를 조파기로 송신하는 기능을 가지고 있고, 컴퓨터, 증폭기, 제어장비등으로 구성되어 있다. 반사율 측정은 본 실험이 주파수영역이 일정한 규칙파를 대상으로 하고 있기 때문에 Healy의 법칙에 근거하여 용량식 파고계 2대를 사용하였으며, 반사율 분석시 파고계 간격을 입사파의 주기에 따라 조정하여 사용하였다. 이외의 주변기기로는 증폭기, 제어장비, A/D Converter, PC(Personal Computer), Camcorder, Digital-camera, 영상처리 software등이 사용되었다.

2.2 모형의 축척 및 제작

모형의 축척은 수로의 크기, 조파성능, 파고, 수심 및 구조물의 마루높이 등을 종합적으로 검토하여 사용하여야 하나, 본 실험은 어느 특정적인 지형 또는 단면을 대상으로 하는 것이 아니기 때문에 축척은 정하지 않았다. 그러나 자연현상과 대비하여 보는 것을 고려하여 1/30의 정상모형에 준하도록 제작하였다. 모형은 Froude 상사법칙에 근거하여 가상원형을 축소하여 제작하였으며, 이해를 돕기 위하여 1/30 축척을 원형과 대비하여 요약하면 다음의 table 2와 같다. Fig 1은 모형의 단면과 파압계의 위치를 나타낸 것이다.

2.3 실험조건

모형실험시 적용한 수심은 모형의 축척비를 1/30으로 가정하였을 경우 약 9.0m에 해당하는 수심으로 하여 모형상 수심을 30cm로 설정하였으며, 조위와 같은 수심의 변화는 실험에 포함하지 않았다.

실험파는 주기를 일률적으로 1.25, 1.50, 1.75, 2.00초 4가지를 선정한 후 파형경사를 고려하여 파고를 설정하였다. 본 연구에 사용된 실험파의 제원을 앞서 언급한 1/30이라 가정하였을 경우, 이해를 돕기 위해 원형 축척과 비교하여 table 3에 나타내었다.

표 2. Froude 상사법칙

항 목	기 호	축 척	예	원 형	모 형
길 이	L_r	L_r	1/30	10 m	33.3 cm
수 심	h_r	L_r	1/30	9 m	30.0 cm
파 고	H_r	L_r	1/30	4 m	13.3 cm
파 장	λ_r	L_r	1/30	100 m	333.3 cm
파 압	p_r	L_r	1/30	1 ton/m ²	3.3 g/cm ²
주기 와 시간	T_r	$L_r^{1/2}$	$(1/30)^{1/2}$	10 sec	1.8 sec
피복재 중량	W_r	L_r^3	$(1/30)^3$	50 ton	185.2 g
단위폭당 중량	w_r	L_r^2	$(1/30)^2$	10 ton/m	1.1 kg/cm
단위폭당 파력	P_r	L_r^2	$(1/30)^2$	400 ton/m	44.4 kg/cm
단위폭당 유효파량	q_r	$L_r^{3/2}$	$(1/30)^{3/2}$	0.1 m ³ /sec/m	6.1 cm ³ /sec/cm

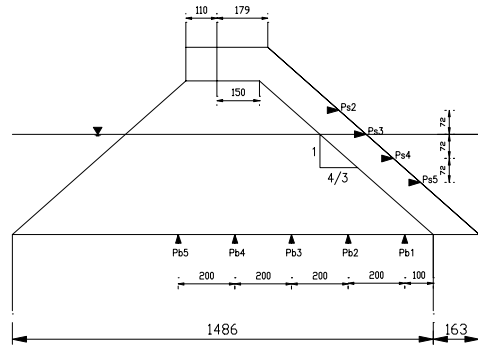


Fig 1. 모형의 제원 및 파압계 위치

표 3. 실험파 제원

수 심 (cm)	원 형		모 형		비 고	
	주기 (sec)	파고 (m)	주기 (sec)	파고 (cm)	H/L	축척
(-)30.0	6.8	1.7	1.25	5.6	0.030	1/30
		2.3		7.5	0.040	
		2.8		9.4	0.050	
		3.4		11.2	0.060	
		3.9		13.1	0.070	
	8.2	2.1	1.50	7.0	0.030	
		2.8		9.4	0.040	
		3.5		11.7	0.050	
		4.2		14.0	0.060	
	9.6	1.7	1.75	5.6	0.020	
		2.5		8.4	0.030	
		3.4		11.2	0.040	
		4.2		14.0	0.050	
	11.0	2.0	2.00	6.5	0.020	
		2.9		9.8	0.030	
		3.9		13.0	0.040	
4.9		16.3		0.050		

3. 실험결과의 비교

처오름 높이의 계측은 제체사면에 파고계를 사면과 나란히 설치한 후 정수면상의 처오름 높이를 계측하였으며, 이외에도 camcoder를 이용하여 실험을 촬영한 후 화상해석법을 이용하여 처오름 높이를 추출하였다. 그 결과 계측 처오름 높이가 화상해석법의 경우보다 약간 낮게 나타났는데, 이는 파고계의 설치시 피복재의 흔들림등으로 인한 파고계의 피해를 피하기 위하여 약간 위로 설치하였기 때문이라고 사료된다. 실험결과의 비교에는 화상해석법의 결과를 사용하며, 실험결과에 대한 시계열 분석에 있어서는 파고계의 계측결과를 사용하였다. 실험결과는 처오름 높이가 전반적으로 일률적으로 변하지 않고 주기에 따라 불규칙하게 나타났으며, Goda(1998)의 처오름 높이 이론식의 결과는 실험치에 비하여 전체적으로 과다한 결과를 나타내었으며, Goda(2002)의 수정식에서는 α 값을 1.0으로 주었을 경우 처오름 높이를 과소평가하게 되는 결과를 나타내었

다. 따라서 Goda(1998)식의 수정은 당연한 것이라 사료되며, Goda(2002)식의 경우에는 α 에 대한 계수값의 조정은 필요한 것으로 판단된다. 이 계수값에 대해서는 피복재의 종류 및 거치방법, 또는 제체 전면 경사에 따라 틀려지므로 계수의 산정에는 그만큼 신중을 기하여야 할 것으로 판단되었다. 실험안별 반사율의 결과인 Fig 2에서는 제체전면의 경사가 완만해질수록 반사율은 감소하였으며, 사면의 경사가 동일한 경우 파형경사가 커질수록 반사율은 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 제체전면의 경사와 파형경사가 동일한 경우 주기가 커질수록 반사율은 증가하는 것으로 나타나 반사율의 산정에 신중을 기하여야 함을 알 수 있었으며, 주기가 1.75이상이 되면 반사율이 조금 크게 산정되는 것을 알 수 있었다.

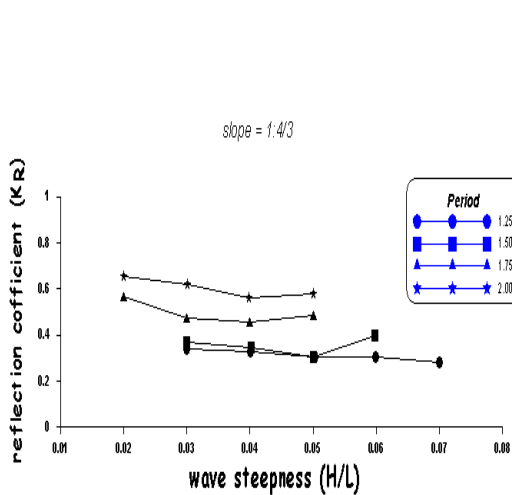


Fig 2. 실험안별 반사율

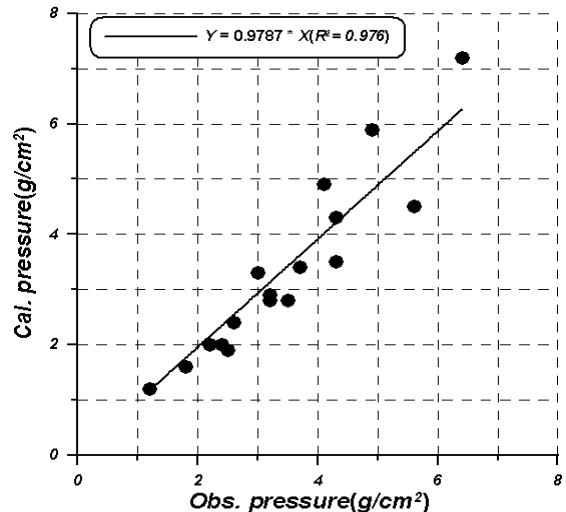


Fig 3. 저면동압의 비교

파압계의 검증을 위하여 정수압상에서 파압을 측정된 결과 정수압의 변화는 이론치와 일치하였으며, 동압에 대한 파압계의 검증을 위하여 미소진폭이론에 의한 동압의 계산치와 입사파랑 조건별로 동압을 측정된 결과 Fig 3과 같이 파압의 크기상 계산치와 실험치는 약간의 차이는 있으나 전반적으로 두 값들의 상대적 차이는 10%내로 양호하게 나타났다. table 4는 Goda의 두식과 실험에서 계측된 처오름 높이를 도표화한 것이며, table 5는 전사면에서 최대 처오름시 파압에 대한 Goda의 두식의 결과와 실험치를 무차원화(P_{max}/wH)하여 나타낸 것이다. 실험결과 전반적으로 파형경사가 증가할수록 처오름 높이도 증가하며, 전사면에서의 파압은 감소하는 것으로 나타났다. 처오름 높이 및 파압의 정량적 크기는 두이론치와 실험치 모두 일치하지는 않는 것으로 계측되었으며, 전반적으로 사면에서의 파압의 공간분포 형태는 이론식이나 실험치나 유사한 것으로 나타났다.

Fig 4는 실험결과중 예로서 주기 1.75sec, 파고 14cm일 때의 위상차에 따른 파압의 공간분포를 도시한 것이다. 그림에서 $t=0$ 인 지점은 최대 처오름시이며, $t=1/4$ 는 1/4주기가 지난 후이다. 결과에서 알수있듯이 파봉이 도달한 후 약 1/2주기 후 파의 처내림으로 인하여 사면 및 저면에서 파압이 (-)의 값을 나타내며, 저면최대파압은 3/4주기에서 1주기사이에서 발생하는 것으로 나타났다.

4. 결론

파압계의 정도를 검토하기 위하여 저면에 설치되어 있는 파압계중 제체 전면쪽으로 맨 앞에 있는 파압계에서 파압 감쇄계수에 대하여 선형파 이론과 실험치를 비교한 결과 전체적으로 이론치와 실험치가 잘 일치하는 것으로 나타나 본 연구에 사용된 파압계의 정도는 양호한 것으로 나타났다

항만 및 어항 설계기준에서 제시하고 있는 Goda(1998)식의 결과는 본 실험결과와 비교하였을 경우 제체의 사면에서의 처오름 높이 및 파압이 실험치보다 크게 추정되었다.

표 4. 처오름 높이의 비교

주기(sec)	파고 (cm)	K_r	H/L	처오름높이(cm)			비교	
				$n_{\max}(A)$	$n_{\max}(B)$	$n_{\text{obs}}(C)$	A/C	B/C
1.25	5.6	0.340	0.030	7.50	3.75	5.00	1.50	0.75
	7.5	0.331	0.040	9.98	4.99	6.00	1.66	0.83
	9.4	0.308	0.050	12.30	6.15	8.00	1.54	0.77
	11.2	0.303	0.060	14.59	7.30	10.00	1.46	0.73
	13.1	0.281	0.070	16.78	8.39	12.50	1.34	0.67
1.50	7.0	0.370	0.030	9.59	4.80	5.00	1.92	0.96
	9.4	0.348	0.040	12.67	6.34	8.00	1.58	0.79
	11.7	0.308	0.050	15.30	7.65	14.00	1.09	0.55
	14.0	0.399	0.060	19.59	9.79	13.00	1.51	0.75
1.75	5.6	0.566	0.020	8.77	4.38	7.50	1.17	0.58
	8.4	0.475	0.030	12.39	6.20	13.00	0.95	0.48
	11.2	0.455	0.040	16.30	8.15	17.50	0.93	0.47
	14.0	0.483	0.050	20.76	10.38	21.50	0.97	0.48
2.00	6.5	0.654	0.020	10.75	5.38	4.00	2.69	1.35
	9.8	0.619	0.030	15.87	7.93	5.00	3.17	1.59
	13.0	0.559	0.040	20.27	10.13	6.50	3.12	1.56
	16.3	0.581	0.050	25.77	12.89	7.50	3.44	1.72

$n_{\max}(A)$: Goda(1998), $n_{\max}(B)$: Goda(2002), $n_{\text{obs}}(C)$: 실험치

Goda(1998)식의 수정은 불가피한 것으로 나타났으며, Goda(2002)식에서 보정계수 α 를 1.0으로 하였을 경우 제체의 사면에서 파압이 주기가 낮은 경우에는 실험치 보다 여전히 크게 나타나 파압을 과도하게 추산하는 것으로 나타났으나, 주기가 길어지면 이론치와 실험치가 거의 일치하는 것으로 나타나 일률적인 보정계수의 크기를 결정하기가 어렵게 나타났다. 그 원인으로서는 단면형상 및 피복재의 종류, 피복재의 거치방법에 따라 그 결과가 다르게 나타나므로 추후 이 부분에 대한 추가실험이 필요할 것으로 사료된다.

제체의 바닥에 작용하는 저면파압은 사면경사와 상관없이 파고가 커질수록 같이 증가하며, 제체 후면으로 갈수록 제체의 높이에 따라 그 값은 감소한다. 그러나 제체 선단부에서는 고파랑시 파압의 크기가 원형상으로 환산하면 (\pm)1.0ton/m²이상의 값을 나타내어 저면 지지력 검토시 파랑에 의해 제체 저면에 작용하는 파압은 고려되어야 할 것으로 판단되나, 추후 이러한 파압에 대한 정량적인 크기에 대하여 토질적인 문제로서의 접근이 필요할 것으로 판단되었다. 그리고 저면에서의 최대 파압은 사면에서의 처오름이 최대가 되기전에 최대가 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 일본토목학회. 1971. 수리공식집.
2. 경사식 방파제의 최적설계기술개발(I). 2000. 해양수산부.
3. 경사식 방파제의 최적설계기술개발(II). 2001. 해양수산부.
4. 경사식 방파제의 최적설계기술개발(III). 2002. 해양수산부.
5. 항만 및 어항설계기준. 1999. 해양수산부
6. 畠田良實 저, 이희운 역. 2000. 토목강좌 해안·항만. 지양사

표 5. 최대 처오름시 무차원 파압의 비교

주기 (sec)	파고 (cm)	구분	P_s2/wH	P_s3/wH	P_s4/wH	P_s5/wH	주기 (sec)	파고 (cm)	구분	P_s2/wH	P_s3/wH	P_s4/wH	P_s5/wH
1.25	5.6	Goda(1998)	0.000	1.260	1.006	0.739	1.75	5.6	Goda(1998)	0.250	1.530	1.373	1.197
		Goda(2002)	0.000	0.630	0.531	0.463			Goda(2002)	0.000	0.765	0.703	0.659
		실험치	0.070	0.375	0.227	0.118			실험치	0.059	0.839	0.593	0.366
	7.5	Goda(1998)	0.293	1.249	0.998	0.733		8.4	Goda(1998)	0.595	1.448	1.299	1.133
		Goda(2002)	0.000	0.625	0.526	0.459			Goda(2002)	0.000	0.724	0.665	0.623
		실험치	-0.032	0.381	0.173	0.028			실험치	0.239	0.752	0.540	0.313
	9.4	Goda(1998)	0.468	1.234	0.988	0.726		11.2	Goda(1998)	0.795	1.438	1.294	1.128
		Goda(2002)	0.000	0.616	0.521	0.454			Goda(2002)	0.074	0.717	0.662	0.62
		실험치	0.018	0.386	0.246	0.087			실험치	0.225	0.694	0.497	0.304
	11.2	Goda(1998)	0.589	1.232	0.986	0.724		14.0	Goda(1998)	0.914	1.429	1.283	1.119
		Goda(2002)	0.000	0.616	0.520	0.453			Goda(2002)	0.199	0.714	0.657	0.615
		실험치	0.027	0.364	0.253	0.120			실험치	0.211	0.505	0.344	0.186
13.1	Goda(1998)	0.702	1.251	0.999	0.734								
	Goda(2002)	0.077	0.625	0.527	0.460								
	실험치	0.027	0.350	0.181	0.037								
1.50	7.0	Goda(1998)	0.271	1.299	1.117	0.918	2.0	6.5	Goda(1998)	0.462	1.566	1.442	1.302
		Goda(2002)	0.000	0.649	0.578	0.527			Goda(2002)	0.000	0.783	0.734	0.699
		실험치	-0.006	0.464	0.346	0.283			실험치	0.012	0.465	0.382	0.315
	9.4	Goda(1998)	0.521	1.283	1.104	0.907		9.8	Goda(1998)	0.816	1.551	1.432	1.294
		Goda(2002)	0.000	0.642	0.571	0.521			Goda(2002)	0.039	0.774	0.728	0.694
		실험치	0.018	0.449	0.278	0.167			실험치	0.028	0.444	0.376	0.281
	11.7	Goda(1998)	0.658	1.274	1.097	0.902		13.0	Goda(1998)	0.985	1.538	1.418	1.281
		Goda(2002)	0.021	0.636	0.567	0.518			Goda(2002)	0.215	0.769	0.721	0.687
		실험치	0.082	0.456	0.280	0.149			실험치	0.055	0.413	0.308	0.217
	14.0	Goda(1998)	0.757	1.267	1.089	0.895		16.3	Goda(1998)	1.086	1.528	1.409	1.273
		Goda(2002)	0.123	0.633	0.563	0.515			Goda(2002)	0.321	0.763	0.717	0.682
		실험치	0.116	0.419	0.241	0.241			실험치	0.107	0.399	0.290	0.202

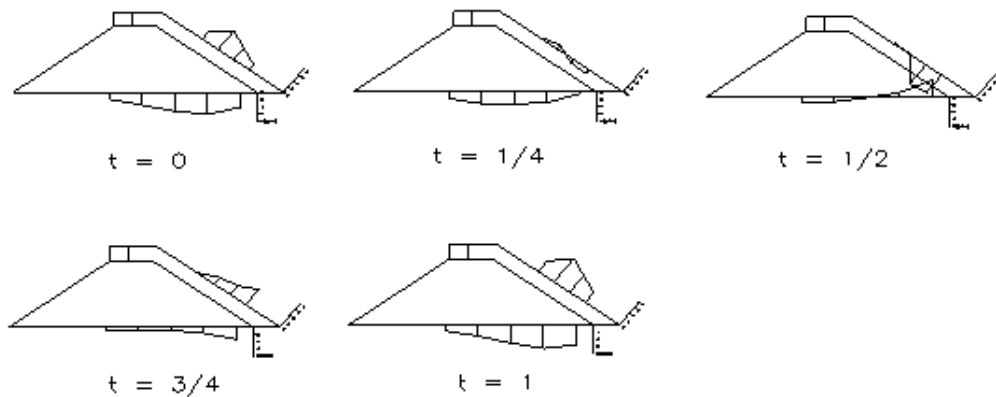


Fig 4. 시간에 따른 파압의 공간분포 예