

# 다중 병렬 분기관을 이용한 압축공기 방파제의 소파효과에 관한 실험적 연구

김종욱\* · 신현수\*

\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

## Experimental Study on Wave Attenuating Effect of a Pneumatic Breakwater by Using a Multiple Parallel Manifold

JONG-WOOK KIM\* AND Hyun-Soo Shin\*

\* Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan 682-792, Korea

**KEY WORDS:** pneumatic breakwater 압축공기 방파제, wave attenuating effect 소파효과, multiple parallel manifold 다중 병렬 분기관, air-discharge 공기 공급량, bubble screen 기포막, surface current 수면흐름

**ABSTRACT:** A series of preliminary model tests are performed to find out the wave attenuating effect of the pneumatic breakwater of environment friendly type, which is a bubble screen generated by releasing compressed air from a submerged multiple parallel manifold. Rising bubbles induce vertical current, which produces horizontal currents flowing away from the bubble-screen area in both directions. Near bottom, the corresponding currents flow toward the bubble screen, thus completing the circulation pattern. The surface current moving against the direction of wave propagation causes some attenuation of the waves. It becomes more effective as the relative depth ( $d/L$ ) increases (short-period waves in deep water). With the same air-discharge, the multiple parallel manifold can be more effective for the attenuation of longer waves through optimum arrangement of manifold number, installation depth, manifold gap, etc. The pneumatic breakwater will give a wide utilization as a device for protecting harbor facilities and as a simple, mobile breakwater.

### 1. 서 론

새로운 항만을 건설하거나 기존 항만의 확장 또는 개량에 있어서 가장 문제가 되는 것 중의 하나는 항내에 충분히 정온한 수역을 확보해야 한다는 것이다. 최근 국가간 해상 물동량이 급증하면서 선박 건조의 증가 및 대형화 추세에 따라 선박계류를 위한 항만을 보유하고 있는 중공업, 조선소 등에서의 항내 선박 접안은 거의 포화상태에 이르고 있으며 항후 선박의 이중접안도 불가피할 것으로 예상된다. 이에 따라 항내 정온도를 향상시키기 위해서 새로운 방파제를 추가 건설하는 방안도 추진되고 있지만 선박 입출항의 용이성, 경제성, 항내 환경오염 문제 등을 고려해 볼 때 그 한계가 있는 실정이다.

일반적인 방파제는 그 자체의 무게와 강도에 의해 강한 파도의 힘을 이겨내고, 파랑이 항내로 침입하는 것을 막도록 되어 있지만, 이와 달리 공기방파제는 해저에 구멍이 뚫린 관을 설치하여 그 구멍으로 압축공기를 분출하여 상승하는 기포에 의해 생기는 수면에서의 흐름을 이용하여 파고를 감소시키는 형태이다. 이러한 압축공기를 이용한 방파제는 일반적인 방파제에 비

해 현장에 설치하거나 철거하는 작업도 간단하고 건설비도 저렴하다는 장점을 가지고 있지만 공기압축기(air compressor)의 시설 운영비, 소파성능의 향상 및 에너지 절감 등의 과제가 산적해 있다. 한편, 중공업 및 조선소 등의 각 작업장에서는 다양한 목적으로 압축공기를 많이 사용하고 있다. 따라서 이러한 산업 항에서는 기존의 방파제로 구성된 항 입구의 해저면에서 분기관(manifold)을 통해 압축공기를 분출시킴으로써 항 바깥쪽에서의 흐름을 이용하여 항내로 들어오는 파고를 감소시키고 항 안쪽에서의 흐름을 이용하여 해수순환을 통한 항내 해역환경을 개선할 수 있다는 관점에서 이를 적극적으로 활용할 필요가 있다.

본 연구는 선박 입출항의 용이성 및 경제성, 해수순환 효과 등이 있다고 알려진 공기방파제의 소파효율 증대를 위해서 다중 병렬 분기관을 이용한 압축공기 방파제를 제안하여 압축공기의 효율적인 상승작용을 통한 수면흐름을 유발하도록 하였으며, 규칙 및 불규칙파를 대상으로 분기관의 다양한 배치에 따른 소파효과를 분석하였다.

### 2. 압축공기 방파제의 기본 개념

압축공기 방파제(pneumatic breakwater)의 기본개념은 Fig. 2에서와 같이 수중에 분기관을 설치하여 압축공기를 방출시킴

제1저자 김종욱 연락처: 울산시 동구 전하동 1번지

052-230-5559 jwkim@hhi.co.kr

으로써 발생하는 기포막(bubble screen)으로 구성된다. 그림에서  $H_1$ 는 입사파고,  $H_2$ 는 투과파고,  $d$ 는 수심을 의미한다. 상승하는 기포들은 연직흐름을 유발하게 되고, 이 연직흐름은 수면부근에서 기포막 영역으로부터 양방향으로 수평흐름을 발생하게 한다. 해저면에는 이와 상응하는 흐름이 기포막 쪽으로 발생하게 되어 결국, 해수순환 패턴을 갖추게 된다. 즉, 입사파의 반대방향으로의 수면흐름은 파를 감소시키고, 입사파 방향으로는 미소한 진동을 가진 흐름으로서 항내의 해수순환 역할을 하게 된다(U.S. Army, 1986).

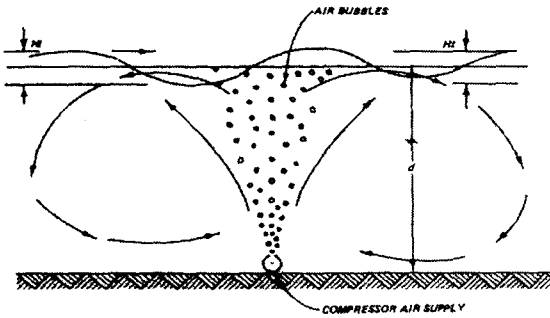


Fig. 2 압축공기 방파제의 개념도

### 3. 실험장치 및 방법

현대중공업 선박해양연구소의 2차원 조파수조에서 다중 병렬 압축공기 방파제 모형을 설치하고 실험을 통한 소파성능 분석을 위하여 Photo 1과 같은 실험장치를 사용하였다.

- 2차원 불규칙 조파수조      - 공기 분배기
- 모형(다중 병렬 분기관)    - 파고계, 유속계, 압력계

#### 3.1 다중 병렬 압축공기 방파제 실험장치

실험에 사용된 2차원 불규칙 조파수조의 제원은 길이 25 m, 폭 80 cm, 깊이 1 m이며, 규칙 및 불규칙파의 재현이 가능하다. 압축공기 주 분기관으로부터 1개의 호스를 조파수조 중앙부 하단의 유량계 및 주 밸브가 부착된 2 m 길이의 관에 연결하고 이 관의 끝단에 15개의 노즐이 부착된 공기분배기로 연결하였다. 15개 노즐 중 1개는 압력계를 부착하여 공기분배기의 내부압력을 측정하였다.

공기분배기의 각 노즐로부터 압축공기를 분출하는 분기관의 배열은 Photo 2와 같다. 공기분배기의 보조밸브는 압축공기의 분출량을 조절하는데 사용한다. 파고계는 공기방파제 모형의 설치지점에서 전후로 각각 5 m 지점에 설치하였다. 상승하는 기포에 의해 수면에서 발생하는 유속을 측정하기 위해서 프로펠러 유속계를 분기관의 중심으로부터 50~100 cm 지점의 수심 25 cm에 설치하였다. 또한, 수조끝단에서의 반사파의 영향을 최소화하기 위해서 소파기를 보완하였다.



Photo 1 공기방파제 실험장치

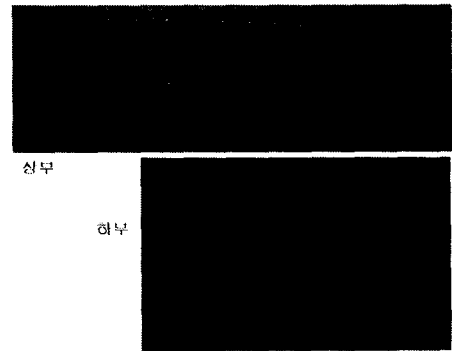


Photo 2 공기분기관의 배열

#### 3.2 실험대상파

규칙파는 파고 2~7 cm, 주기 0.6~1.5 sec 범위를 대상으로 하였다. 수조내의 수심 70 cm로 하였다. 규칙파에 대한 한 예로써 파고  $H_1=5$  cm에 대한 실험제원을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서  $H$ 는 파고,  $L$ 는 파장,  $C$ 는 파속,  $d$ 는 수심,  $L_0$ 는 심해 파장을 의미한다.

한편, 불규칙파는 Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼의 유의파고  $H_{1/3}=5.0$  cm, 유의파 주기  $T_{1/3}=0.9\sim 1.3$  sec를 실험대상파로 선정하였다. 계측시간은 250 sec이며 1초당 20개의 데이터(계측 시간간격= 0.05 sec)를 계측하였다.

Table 1 규칙파 실험대상파 (예 :  $H_1=5$  cm)

No.	Incident wave		수심 = 0.7 m				
	Height (m)	Period (sec)	$L_0$ (m)	$L$ (m)	$C$ (m/sec)	$d/L$	$H/L$
1	0.05	1.05	1.72	1.70	1.62	0.412	0.297
2	0.05	1.15	1.69	1.65	1.60	0.378	0.277
3	0.05	1.25	1.66	1.61	1.55	0.348	0.258
4	0.05	1.35	1.63	1.57	1.50	0.322	0.242
5	0.05	1.45	1.60	1.53	1.45	0.298	0.228
6	0.05	1.55	1.57	1.49	1.40	0.278	0.212
7	0.05	1.65	1.54	1.45	1.35	0.258	0.198
8	0.05	1.85	1.47	1.37	1.27	0.212	0.162
9	0.05	1.95	1.44	1.33	1.23	0.198	0.148
10	0.05	2.15	1.39	1.27	1.17	0.162	0.122
11	0.05	2.25	1.36	1.23	1.13	0.148	0.108
12	0.05	2.35	1.33	1.19	1.09	0.138	0.102
13	0.05	2.45	1.30	1.15	1.05	0.128	0.098
14	0.05	2.55	1.27	1.11	1.01	0.118	0.092

#### 4. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 다중 병렬 압축공기 방파제의 다양한 배치에 따른 소파효과를 실험적으로 분석하였다. Photo 3은 공기 방파제의 전면과 후면의 파랑상태를 비교할 수 있는 한 예로써 공기공급량  $A=120\text{ L/min}$ , 5열의 분기관을  $10\text{ cm}$  간격으로 수심  $70\text{ cm}$ 에 설치했을 경우 입사 파고  $H_i=7\text{ cm}$ , 입사파 주기  $T_i=0.7\text{ sec}$ 의 규칙파를 대상으로 다중 병렬 압축공기 방파제의 소파효과를 보여주는 것이다.

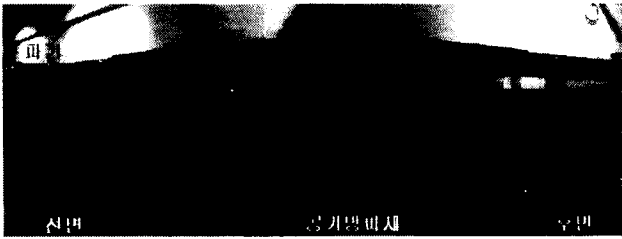


Photo 3 공기방파제 전면 및 후면의 파랑상태

##### 4.1 규칙파 실험결과

###### (1) 파고별 수심/파장 비에 따른 소파효과

수조 저면(설치수심  $h=70\text{ cm}$ )에 5열의 분기관을  $10\text{ cm}$ 간격으로 배치하였다. Fig. 1은 공기공급량이  $A=300\text{ L/min}$ 가 되도록 유지하고  $H_i=2\sim 7\text{ cm}$ ,  $T_i=0.6\sim 1.5\text{ sec}$ 의 입사파를 대상으로 다중 병렬 공기방파제의 소파효과를 실험한 결과이다. Fig. 1에서 가로축은 수심( $d$ )과 파장( $L$ )의 비를 나타내며, 세로축은 입사파( $H_i$ )에 대한 투과파( $H_t$ )의 비를 나타낸다.  $H_t/H_i$ 가 작을수록 소파효과가 커짐을 의미한다. 공기공급량( $A$ )이 일정할 경우, 입사파고에 따른 영향은 뚜렷하게 나타나지 않지만 입사파장이 수심에 비해 짧을수록 소파효과가 커짐을 알 수 있다. 특히,  $d/L > 0.45$ 인 조건에서는 입사파의 50%이하로 감소하기 시작하면서 소파효과가 현저하게 증가하는 경향을 보였다.

###### (2) 분기관 간격별 수심/파장 비에 따른 소파효과

Fig. 2는 공기공급량  $A=120\text{ L/min}$ ,  $h=70\text{ cm}$ , 5열의 분기관을 각각  $5, 10, 20\text{ cm}$  간격으로 설치하여 실험한 결과이다. 우선, 분기관의 간격에 따라 소파효과가 달라짐을 알 수 있다. 또한, 수심/파장 비가 클수록 Fig. 1에서와 마찬가지로 소파효과가 커짐을 알 수 있다. 결국, 분기관의 개수가 동일하더라도 배치방법을 적절히 선택하여 소파효과를 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

###### (3) 설치수심( $h$ )별 수심/파장 비에 따른 소파효과

Fig. 3은 공기공급량  $A=300\text{ L/min}$ 일 때 15열의 분기관을  $10\text{ cm}$  간격으로 구성하고 설치수심( $h$ )을 각각  $55, 60, 70\text{ cm}$

로 변화시키면서 실험한 결과이다. Fig. 3에서도 수심/파장 비가 클수록 소파효과가 커지는 경향을 보였고, 모형의 설치수심( $h$ )이 깊을수록 소파효과가 커짐을 알 수 있다. 따라서 공기방파제는 해저면 가까이에 설치하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

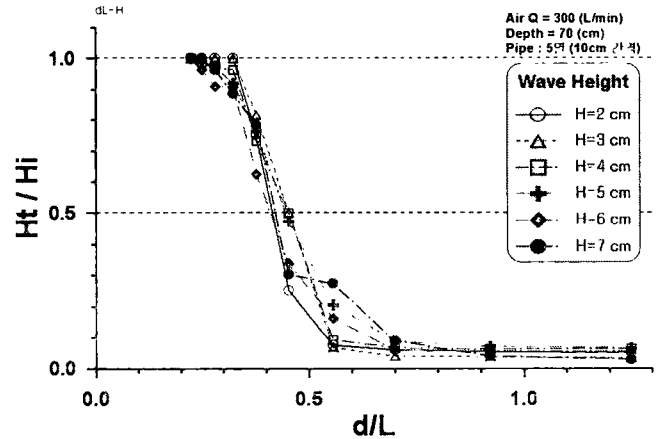


Fig. 1 파고별 수심/파장 비에 따른 소파효과

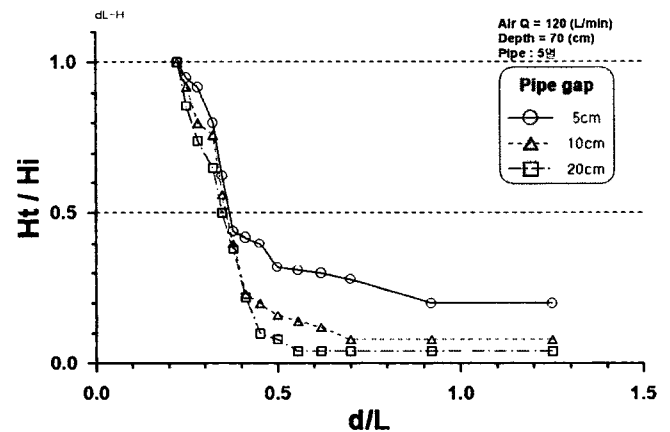


Fig. 2 분기관 간격별 수심/파장 비에 따른 소파효과

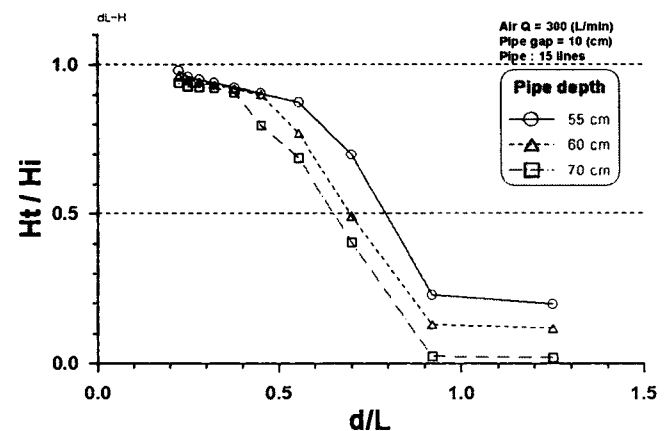


Fig. 3 설치수심( $h$ )별 수심/파장 비에 따른 소파효과

## 4.2 불규칙파 실험결과

### (1) 공기공급량(A)의 변화에 따른 소파효과

공기공급량(A)의 변화에 따른 소파효과의 한 예로서 Fig. 4에 공기방파제의 설치수심  $h=70\text{ cm}$ 인 경우 공기공급량( $A=120\sim 300\text{ L/min}$ )의 변화에 따른 소파효과를 나타내었다. 이때, 분기관 개수는 5개, 분기관 간격은  $20\text{ cm}$ 이다. Fig. 4에서 가로축은 주파수를 나타내며, 세로축은 파에너지 스펙트럼의 밀도함수값을 나타낸다. 실험에 사용된 입사파의 제원은  $H_{1/3}=5.0\text{ cm}$ ,  $T_{1/3}=0.9\text{ sec}$ 이며, 그림의 상단에 입사파가 공기방파제를 통과한 후의 투과파에 대한 유의파고( $H_{1/3}$ )를 나타내었다. 분기관 개수 및 간격이 동일함에도 불구하고 공기공급량을 증가시키기에 따라 입사파의 에너지가 크게 감소하는 경향을 보인다. 특히,  $A=300\text{ L/min}$ 인 경우 입사파고에 비해 14% 이하로 감소하였고, 저주파수 영역에서도 파에너지를 저감시킬 수 있었다. 그러므로 다량의 공기 분출이 소파효과에 크게 기여함을 알 수 있다.

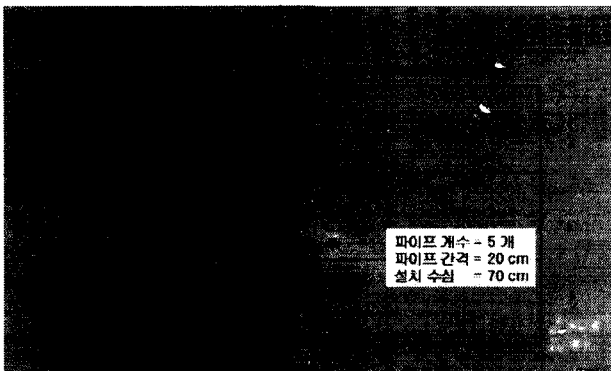


Fig. 4 공기공급량(A)의 변화에 따른 소파효과

### (2) 설치수심(h)의 변화에 따른 소파효과

설치수심(h)의 변화에 따른 소파효과의 한 예로서 공기공급량  $A=120\text{ L/min}$ , 5열의 분기관을  $20\text{ cm}$  간격으로 구성하고 설치수심(h)을 각각  $30, 50, 70\text{ cm}$ 로 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

우선, 전반적으로 고주파수 영역에서는 소파효과가 현저하게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이것은 규칙파 실험에서의 수심/파장 비에 따른 소파효과의 결과와 유사하다. 공기공급량이 동일함에도 불구하고 공기방파제 분기관의 설치수심(h)이 깊을수록 입사파의 에너지를 많이 감소시킴을 알 수 있다. 특히 설치수심  $h=70\text{ cm}$ 인 경우는 입사파의 파고에 비해 34%까지 저감되는 것을 보였다. 이것은 공급된 공기가 수면 하에서 분출된 후 상승하면서 수면 부근에서 보다 두꺼운 층의 흐름을 유발하기 때문이라 생각된다. 이러한 현상은 Photo 4를 통해 알 수 있다. Photo 4는 동일한 공기공급량( $A=120\text{ L/min}$ )에 대해서 설치수심 및 분기관 개수에 따른 압축공기의 상승 패턴을 보여준다. 설치수심  $h=70\text{ cm}$ 인 경우를 보면, 상승하는 기포영

역이 가운데로 집중한 후 수면 부근에서 양방향으로 두꺼운 층의 수면흐름을 형성함을 알 수 있고 유속 증가의 효과도 가져왔다. 이로 인해서 공기방파제 전면으로부터의 파를 흐름상에서 쇄파시키면서 소파효과가 증대됨을 실험 중에 관찰할 수 있었다.

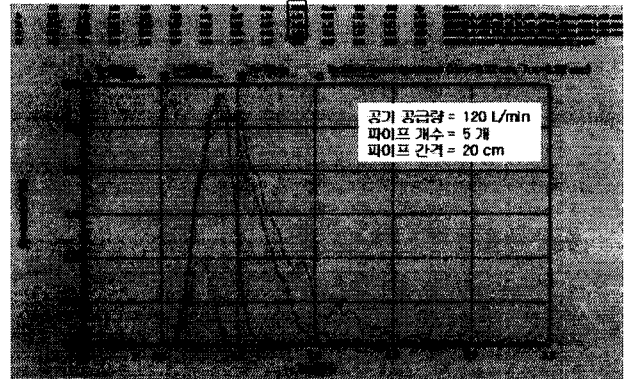


Fig. 5 설치수심(h)의 변화에 따른 소파효과

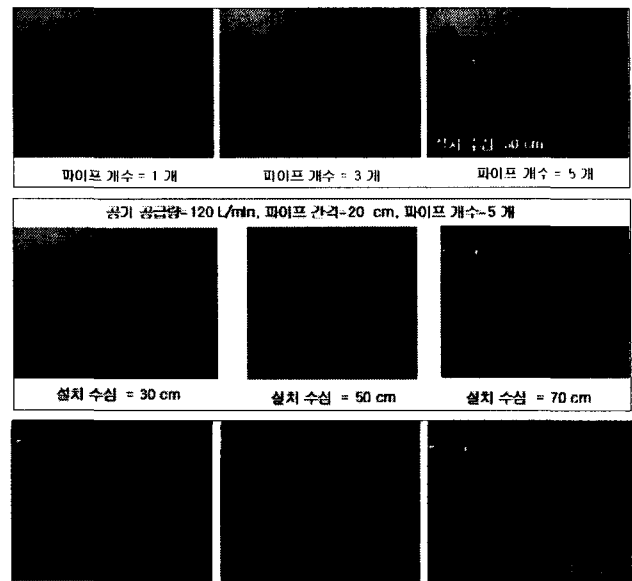


Photo 4 설치수심 및 분기관 개수에 따른 공기분출 현상(예)

### (3) 분기관 간격별 분기관 개수의 변화에 따른 소파효과

공기방파제의 분기관 간격( $10, 15, 20\text{ cm}$ )별 분기관 개수( $1, 3, 5, 7$ 개)의 변화에 따른 소파효과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 공기방파제의 설치수심( $h=70\text{ cm}$ )과 공기공급량( $A=120\text{ L/min}$ )은 동일한 조건으로 하였다. 입사파의 제원은  $H_{1/3}=5.0\text{ cm}$ ,  $T_{1/3}=0.9\text{ sec}$ 이다.

Fig. 6에서와 같이 분기관 간격이  $10\sim 15\text{ cm}$ 인 경우에는 분기관의 개수가 증가할수록 입사파의 에너지가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 분기관의 간격이  $20\text{ cm}$ 인 경우에는 설치수심, 공기공급량, 분기관 간격이 동일함에도 불구하고 분기관 개수가 3개, 5개로 증가할수록 입사파의 에너지가

전반적으로 감소하는 경향을 보이다가 7개의 경우에는 5개의 경우보다 효율적이지 못하다. 이러한 현상은 일정한 공기공급량에 비해서 분기관의 개수가 일정 개수 이상이 되면, 분출되는 공기의 분산으로 인해 수면부근의 수평흐름 유속을 충분히 생성하지 못하기 때문이다.

상당히 감소하는 경향을 보였다. 그러나 분기관이 5개인 경우에는 큰 차이가 없었고 7개인 경우에는 분기관의 간격이 넓을수록 역효과를 보였다. 이러한 현상은 Fig. 6에서와 언급한 바와 같이 일정한 공기공급량에 대해서 분기관의 개수 및 분기관의 간격이 일정 간격 이상이 될 경우 상승하는 기포영역이 분산하기 때문이다.

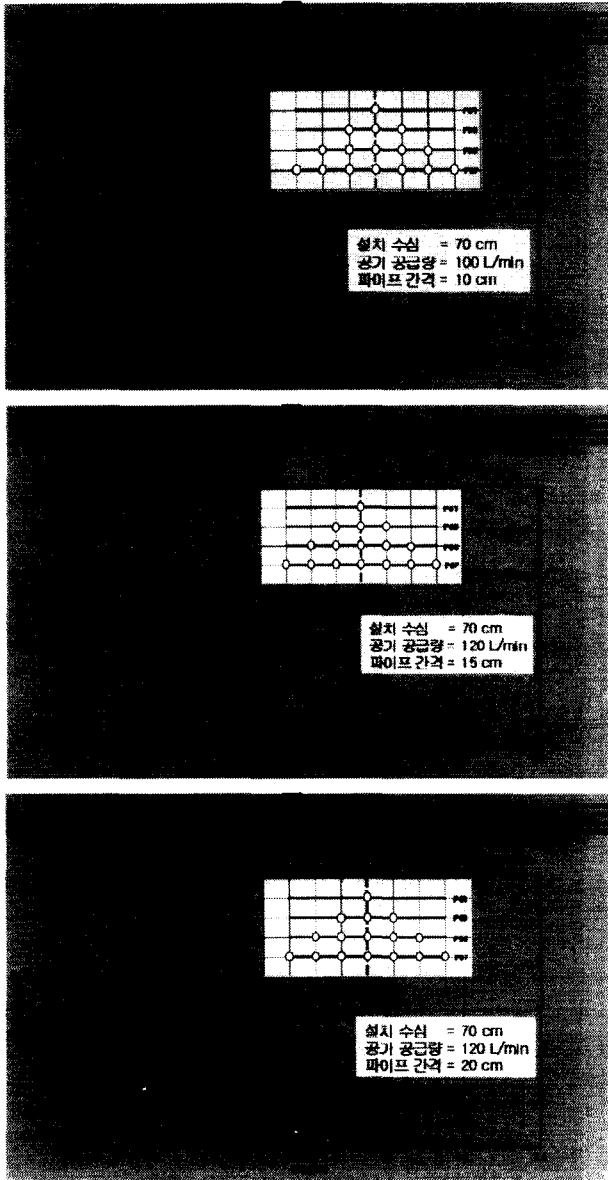


Fig. 6 분기관 간격별 분기관 개수에 따른 소파효과

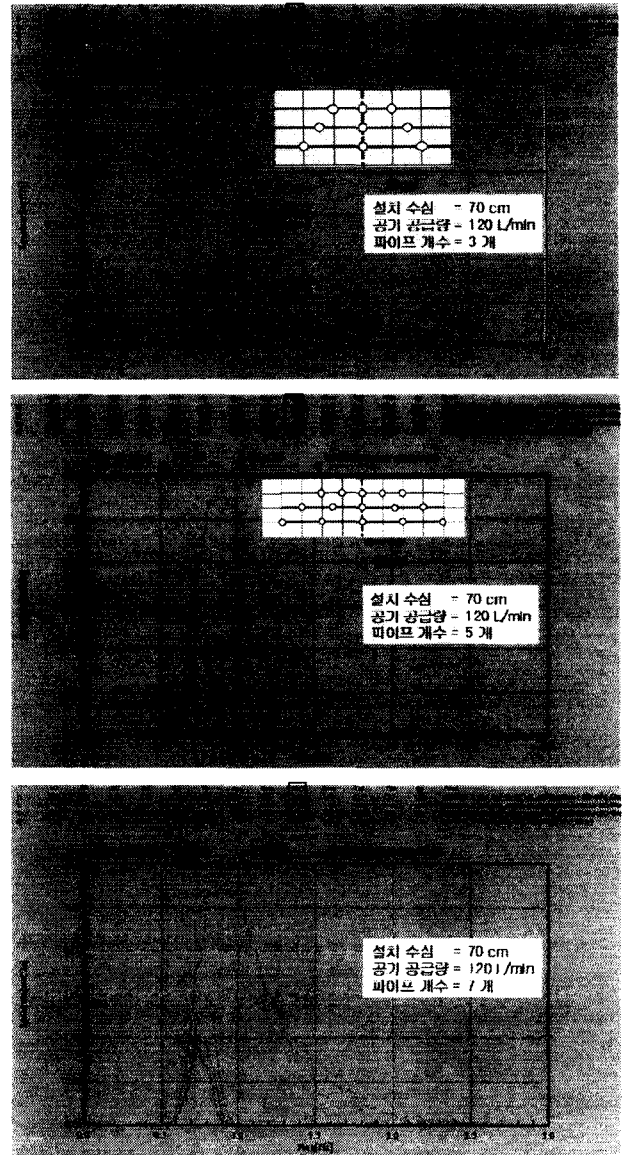


Fig. 7 분기관 개수별 분기관 간격에 따른 소파효과

(4) 분기관 개수별 분기관 간격의 변화에 따른 소파효과

공기방파제의 분기관 개수(3, 5, 7개)별 분기관 간격(10, 15, 20 cm)의 변화에 따른 소파효과를 Fig. 7에 나타내었다. 이때, 공기방파제의 설치수심( $h=70\text{ cm}$ ), 공기공급량( $A=120\text{ L/min}$ )은 동일한 조건으로 하였다. 입사파의 제원은  $H_{1/3}=5.0\text{ cm}$ ,  $T_{1/3}=0.9\text{ sec}$ 이다.

Fig. 7에서 동일한 설치수심, 공기공급량에 대해서 분기관이 3개인 경우에는 분기관의 간격이 넓을수록 입사파의 에너지가

(5) 입사파 주기( $T_{1/3}$ )별 공기공급량의 변화에 따른 소파효과

Fig. 8에 유의파고  $H_{1/3}=5.0\text{ cm}$ 에 대한 주기( $T_{1/3}=0.9\sim 1.3\text{ sec}$ )별 공기공급량( $A$ )의 변화에 따른 소파효과를 나타내었다. 이때, 공기공급량은  $A=120\sim 600\text{ L/min}$ , 분기관 간격은  $10\text{ cm}$ 로 15개의 분기관을 수심  $70\text{ cm}$ 에 설치하였다. 전반적으로 유의파 주기가 짧을수록, 공기공급량이 증가할수록 소파효과가 커지는 경향을 보인다. 각 그림에서 고주파수 영역에서는 파

에너지의 감소효과가 크게 나타나지만 저주파수 영역에서는 그 효과가 작다. 특히  $T_{1,0}=1.3$  sec인 경우 저주파수 영역에서의 파 에너지 감소효과는 거의 없을 정도이다. 이러한 경우에는 훨씬 많은 양의 공기공급과 함께 분기관의 개수 및 간격을 보다 적절히 배치할 필요가 있다.

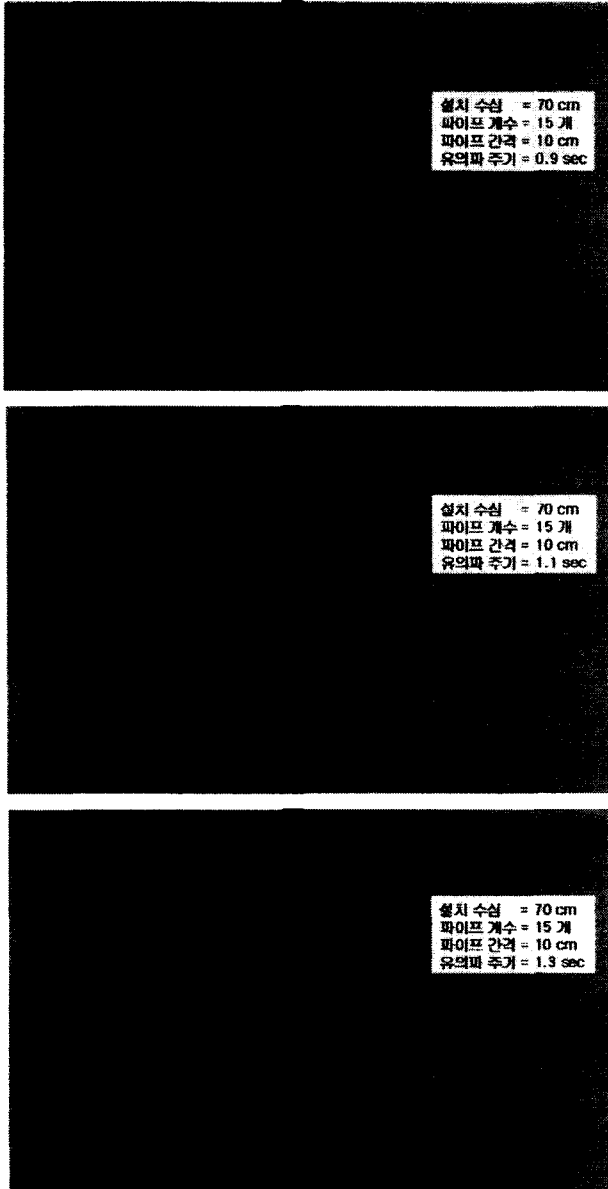


Fig. 8 유의파 주기별 공기공급량(A)에 따른 소파효과

## 5. 요약 및 결론

본 연구는 선박 입출항의 용이성 및 경제성, 항내 소파효과, 해수교환 촉진 효과 등이 있다고 알려진 공기방파제의 하나로 소파효율성 증대를 위한 다중 병렬 압축공기 방파제 시스템을 제안하고 이에 대한 소파효과를 실험적으로 조사하였으며 그

결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2차원 수조에서의 규칙 및 불규칙과 실험을 통해서 다중 병렬 압축공기 방파제의 소파효율성을 확인하였다.
- (2) 수심( $d$ )/파장( $L$ ) 비가 클수록, 공기공급량( $A$ )이 많을수록, 설치수심( $h$ )이 깊을수록 소파효과가 현저히 증가하였다.
- (3) 동일한 공기공급량에 대해서도 공기방파제의 배치방법(분기관의 개수 및 배치간격, 설치수심 등)에 따라 그 효과가 크게 달라지므로, 입사파 특성 및 수심 등을 고려하여 공기공급량과 다중 병렬 분기관의 배치를 최적화함으로써 소파효과를 크게 향상시킬 수 있다.
- (4) 다중 병렬의 압축공기 방파제를 산업항 등의 입구 및 도크 해저면에 설치·운영함으로써 다음과 같은 기대효과를 가져올 수 있다.
  - 다중 병렬 분기관을 이용하면 분기관의 적절한 배치로 동일한 공기공급량으로도 수면 부근 흐름의 속도와 두께를 증대시켜 소파효과를 현저히 증대시킬 수 있다.
  - 설치수심이 깊을수록 효과적이므로 해저면에 설치함으로써 선박의 입출항에 지장을 주지 않는다.
  - 평상시에는 가동하지 않고 필요에 따라 가동시킴으로써 설치 및 유지보수를 포함한 시설 운용면에서 경제적이다.
  - 해저면으로부터 분출된 압축공기가 해수면에서의 흐름을 유발하므로 항내의 해수순환 촉진을 통해 항내 해역환경을 개선할 수 있다.
  - 항내의 선박계류 및 작업성을 고려하여 다양한 특성의 입사파에 즉각적으로, 탄력적으로 대응하기에 유리하다.

## 참 고 문 헌

- Colonell, J. M., Carver, C. E., Jr., and Lacouture, J. M. (1974), "Attenuation of Wind-Generated Deep Water Waves by Pneumatic and Hydraulic Breakwaters", Proceedings of the Floating Breakwater Conference, University of Rhode Island, Kingston, Rhode Island, pp 131-158.
- Evans, J. T. (1955), "Pneumatic and Similar Breakwaters", The Dock and Harbor Authority, June
- Heath, W. A. (1959), "Pneumatic Breakwater Development in England", The Military Engineer, March-April
- Laurie, A. H. (1952) "Pneumatic Breakwaters", The Dock and Harbor Authority, Vol. 33, May
- Taylor, G. I. (1955), "The Action of a Surface Current Used as a Breakwater", Proceedings of the Royal Society of London, London, England, Series A, V1 231, pp 466-478.
- U.S. Army (1986), "Design of Breakwaters and Jetties", U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Manual 1110-2-2904.