

## 제5장 수중발파

### 5.1 수중발파 개요

수중발파(Under Water Blasting)는 대상암석의 일부 혹은 전부가 물로 덮여 있는 경우의 발파를 말한다. 천공이나 장약 및 배선작업 등이 모두 수중에서 이루어지므로 일반발파와는 다른 점이 많다.

수중발파의 특성은 첫째, 천공 착점이 수면 아래이므로 잠수부들이 천공작업을 해야 하고 별도의 주상작업이 필요할 뿐만 아니라 공의 방향이나 정밀도를 확인하기 힘들다는 점을 들 수 있다. 또 천공을 실시한 천공 중에는 장약불능공이 2~10%에 달하므로 천공수가 육상시보다 늘어난다. 둘째로, 육상의 계단식발파보다 장약량이 증가하는데 수심에 따라 3~6배에 달하기도 한다. 셋째로, 뇌관장치가 특수하며 전기뇌관의 경우에는 도통시험 외에 누전측정도 필요하다. 배선이 완료된 후 뇌관과 각선과 모선의 도선이 못 쓰게 되는 경우도 5~20%나 되므로 이를 고려하여 천공수나 장약량을 충분히 해야 한다.

발파 기법상 수중발파는 계단식발파와 비슷하나 물이 폭발압을 감소 및 완충시키므로 발파 설계시 수압을 고려해야 하고 불발 또는 장약공 간의 공폭에 의해 균열이 불완전해질 우려가 있어 계획공간거리와 장약량의 편차를 더 많이 고려해야 한다.

파쇄된 암석을 준설하거나 폐석 운반할 때는 파쇄 정도가 중요한 실제문제로 대두되는데 바닥면을 고르게 하기 위해서는 상당량의 초과천공이 필요하며 수심이 깊은 경우나 진흙으로 덮인 지역은 장약량이 특히 증가하는 점도 계단식발파와는 다른 점이다.

수중발파가 실시되는 것은 다음과 같은 경우이다.

- ① 항만이나 해협, 하천, 호소 등의 준설, 항만시설, 호안공사
- ② 교각의 기초
- ③ 해저에 침몰한 선박의 첩판절단
- ④ 어초 조성, 해저암초의 제거 및 이동, 어초용 콘크리트블럭 안치
- ⑤ 기뢰, 어뢰, 폭뢰 등의 폭발
- ⑥ 지진탐사 등을 위한 해저 발파

### 5.2 발파방법

수중발파는 장약방법으로 다음의 3종류로 나누어 크게 구별하고 있다.

#### 5.2.1 수중현수발파

수중에 폭약을 매어단 형태로 발파하는 방법이다. 수중현수발파는 폭약을 수중에서 폭발시킴으로써 물이 그 압력에 의해 압축되는 성질을 이용해서 사물의 파괴나 변형시키는 것을 목적으로 한 것이며, 기뢰, 어뢰, 폭뢰 등의 폭발은 이 형식이다. 또한 폭발성형 등 물의 압축성을 이용해서 금속의 성형을 할 때에도 이 방법이 이용되고 있다.

#### 5.2.2 수중부착발파

수중의 암석이나 구조물 표면에 부착한 상태로 발파하는 방법이다.

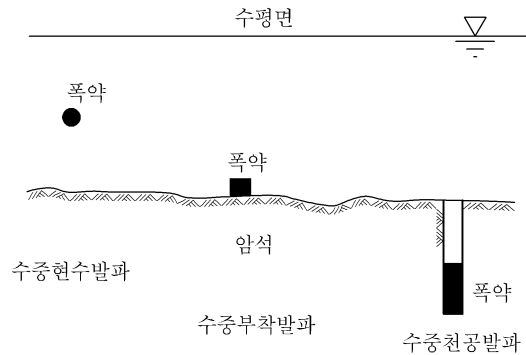


그림 5.1 수중발파법

피파괴물 표면에 폭약을 부착해서 발파하는 것으로, 천공을 하지 않은 채 발파할 수 있다는 장점이 있지만 피파괴물의 표면 중에서 폭약에 접한 부분과 아주 가까운 곳이 파괴될 뿐이므로 발파효과로 본다면 대단히 효율이 낮기 때문에 수중발파의 방법으로서 이용되는 것은 특수한 경우에 한한다.

### 5.2.3 수중천공발파

피파괴물 내부에 천공해서 천공부에 폭약을 장약하여 발파하는 방법이다. 앞의 2가지 발파 방법에 비해 발파효과는 좋지만 단순히 수중에서 천공하기 위한 굴착 등 여러 가지 곤란한 문제들이 있다.

## 5.3 천공방법

수중에서 발파를 위해 발파공을 천공할 경우, 얇은 수중에서는 육상의 천공과 같은 방법으로 하면 좋겠지만 수심이 증가되면 수압, 수류의 영향을 받아 동시에 천공공법을 유지하기가 곤란하게 된다. 수중천공에 잠수부가 드릴을 수중으로 가져가 작업할 수도 있으나 천공수가 증가하면 능률이 좋지 않고 경제적이지 못하다. 따라서 굴착규모가 커짐에 따라 천공 방식을 채용하기 위한 기술이 검토되고 있다.

### 5.3.1 수중에서 천공

수중에서 굴착시공을 하려면 잠수부가 수중착암기를 지참해서 천공하던가, 수중크롤러드릴의 조작으로 천공하는 방법이 있다. 이 방법은 수심 20m까지이며 가동범위에는 한계가 있지만 간단한 방법이다.

잠수함, 잠수선 등을 이용하는 방법으로는 수심 200m까지 작업이 가능하다. 또한 수중불도저를 원격 조작하는 방법 등이 있다. 수중에서의 천공작업은 수심이 깊어지면 잠수작업이 곤란하고, 또한 정확하게 천공위치를 확인할 수 없을 때가 많아 작업상의 한계가 있다.

### 5.3.2 수상에서 천공

수상에서 굴착 시공하는 방법은 근년에 와서 점차 개발되고 있다. 수심 20m까지는 앵커 고정식 해상발판으로 해서 부상형 해상발판, 가잠형 및 반가잠형 해상발판, 바지선용이나 유전 착정용, 불링용 등에 사용된다. 수상에서의 굴착은 수중에 로드(Rod) 및 비트(Bit)를 내려서 하지만 수류, 조류, 파압 등을 받으므로, 로드 선단이 흘러내려 천공정도가 나빠진다. 또한 로드는 상기 외력 때문에 수평진동을 일으키고, 공진현상이 일어나 진폭이 증대되거나 크나큰 휨응력이 발생한다. 그러므로 로드 자체의 강도는 이에 견딜 수 있는 것이라야 하며 로드가 충분히 보호되도록 이중관을 사용하게 된다. 수중에서는 때때로 한번 천공된 구멍의 입구나 외벽이 수류에 의해 바닥면을 덮는 표토로 다시 매립되어, 발파공에 폭약을 채울 수 없을 때가 있다. 이를 방지할 목적으로 개발된 것 중에 표토층 천공기가 있으며, OD천공기(Overburden Drilling machine)라고 하는 것이 이중관 로드로 천공하는 천공방식이다.

해양조건의 일정한 조건까지는 문제없이 천공이 가능하지만 수심, 조류 및 파랑이 더욱 증대하면 이중관이라도 휨응력에 견딜 수 없을 때가 있다. 그런 경우에는 특별한 파이프 및 수중 틀로 이중관 파이프를 보호해야 하므로 작업선을 사용하게 된다. 자양식 작업대(Self-Elevating Platform(SEP))가 점차 대형화되어 실용화되고 있으며, 천공기는 SEP이동장치대 위에 설치된다. SEP작업대 위에 착암기를 설치하고 천공하면 희망하는 위치에 희망하는 간격과 깊이로 천공할 수가 있다.

그림 5.2는 SEP상의 OD천공기 가동현상을 나타낸다. 또한 그림 5.3은 대형 SEP에서 행해지는 천공의 순서를 나타낸다. 그림 5.3과 같이 착암기의 타격력은 착암기에 로드를 부착하기 위한 특수 샹크아답터에서 드릴 파이프와 연결, 전달되며 회전토크는 별도로 에어모터에서 전달된다. 타격과 동시에 회전이 부여되어 물 바닥인 지표에서 기반으로 천공한다. 소정심도까지 천공하면 연결 로드가 회수되고 Casing Pipe가 남아, 수중 또는 표토층에 영향 없이 다음 작업이 작업비계에서 쉽게 행해지는 것이다. 폭약은 이중관 내부를 통해 장전된다.

## 5.4 발파설계

수중발파에는 수중현수발파, 수중부착발파 및 수중천공발파 등 3가지 종류가 있으며 각각 설계, 공법 등에 이르기까지 다른 방법에 의한 것이 된다. 그러나 앞으로의 수중 발파로서 주력은 수중천공 발파법이 차지할 것이며, 가장 효과적인 발파도 물론 천공발파법이다.

수중발파의 설계시 고려해야 할 사항은 폭약의 선정, 발파진동, 수중충격파, 장약과 장약상태의 검사, 기폭장치와 점화 System의 체크 등이다.

### 5.4.1 장약과 장약량

수중에서의 장약작업은 육상과 비교해서 어렵고 위험이 따르기 때문에 특별히 안전에 주의하여야 한다. 수중발파 후의 회수나 잔류 재발파 등의 극히 곤란한 작업이 되므로 절대로 확실한 발파를 할 필요가 있다.

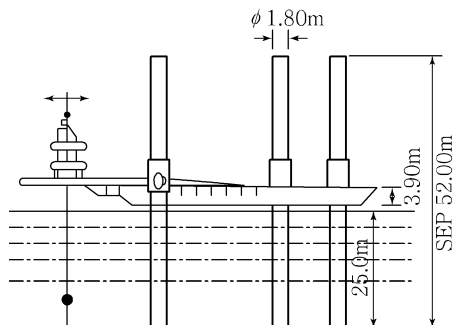


그림 5.2 SEP와 천공기 중 OD천공기

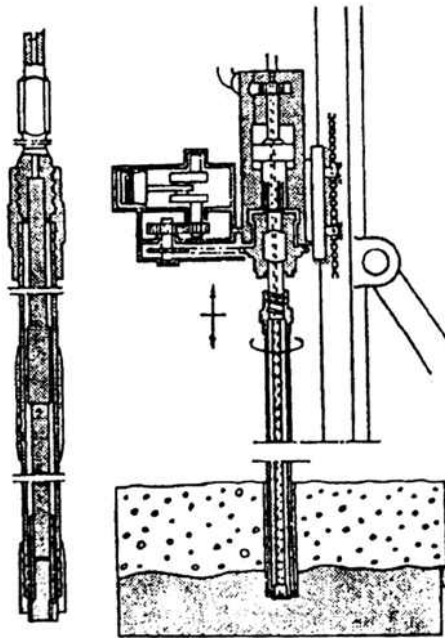


그림 5.3 OD천공기의 원리

## 5.4 발파설계

수중발파에는 **수중현수발파**, **수중부착발파** 및 **수중천공발파** 등 3가지 종류가 있으며 각각 설계, 공법 등에 이르기까지 다른 방법에 의한 것이 된다. 그러나 앞으로의 수중 발파법은 가장 효과적인 수중천공 발파법이 될 것으로 예측된다. 수중발파의 설계시 고려해야 할 사항은 폭약의 선정, 발파진동, 수중충격파, 장약과 장약상태의 검사, 기폭장치와 점화 시스템의 체크 등이다.

### 5.4.1 장약과 장약량

수중에서의 장약작업은 육상과 비교해서 어렵고 위험이 따르기 때문에 특별히 안전에 주의하여야 한다.

수중발파 후의 회수나 잔류 재발파 등의 극히 곤란한 작업이 되므로 절대로 확실한 발파를 할 필요가 있다.

- ① 일반적으로 계단식 발파에서 경암의 경우 충분한 파쇄를 위해서 비장약량이  $0.5 \text{ kg/m}^3$  정도 필요하나 수중발파의 경우 두공 중 하나정도 불발이 발생할 것으로 가정하여 비장약량을  $1.0 \text{ kg/m}^3$ 로 한다.
- ② 경사공의 경우는 비장약량을  $1.0 \text{ kg/m}^3$ 로 하나, 수직공의 경우는 파쇄가능성을 높게 하기 위해서 비장약량을 10% 증가한  $1.1 \text{ kg/m}^3$ 로 한다.
- ③ 수압을 보정하기 위해서 수심  $m$ 당  $0.01 \text{ kg/m}^3$ 의 비장약량을 증가시킨다.
- ④ 진흙으로 암반이 덮여 있는 경우, 진흙층의 두께  $m$ 당  $0.02 \text{ kg/m}^3$ 의 비장약량을 증가시킨다.

⑤ 암석층을 보정하기 위해서 계단높이  $m$ 당  $0.03 \text{ kg/m}^3$ 의 비장약량을 증가시킨다. 따라서 비장약량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{경사공} &= 1.0 + 0.01 \times \text{수심}(m) + 0.02 \times \text{진흙두께}(m) \\ &+ 0.03 \times \text{계단높이}(m) \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{수직공} &= 1.1 + 0.01 \times \text{수심}(m) + 0.02 \times \text{진흙두께}(m) \\ &+ 0.03 \times \text{계단높이}(m) \end{aligned} \quad (5.2)$$

⑥ 공간격( $S$ )과 저항선( $B$ )는 같고 Sub-drilling( $U$ )은 저항선과 같거나 최소한 0.8m는 되어야 한다.

⑦ 천공깊이( $L$ )는 계단높이( $H$ )+Sub-drilling( $U$ )이고 무장약부분( $h_o$ )은 저항선의  $1/3$  정도 ( $h_o = B/3$ )로 하며 최소한 0.5m 이상으로 한다.

표 5.1은 특별한 장애가 없는 경우 수직공에 대한 천공 및 장약기준표이다.

표 5.1 수중수직 천공발파의 천공 및 장약기준

천공 지름 (mm)	벤치높이 (m)	천공장 (m)	수심 (m)	최소 저항선 (m)	천공간격 (m)	장약량		이론적 장약량 ( $\text{kg/m}^3$ )
						kg	kg/m	
30	2.0	2.9	2.0~5.0	0.90	0.90	2.1	0.9	1.14
	5.0	5.8	2.0~5.0	0.85	0.85	4.8	0.9	1.20
	2.0	2.8	5.0~10.0	0.85	0.85	2.1	0.9	1.16
	5.0	5.8	5.0~10.0	0.85	0.85	4.8	0.9	1.25
40	2.0	3.2	2.0~5.0	1.20	1.20	4.5	1.6	1.11
	5.0	6.2	2.0~5.0	1.15	1.15	9.3	1.6	1.20
	7.0	8.1	5.0~5.0	1.10	1.10	12.3	1.6	1.26
	7.0	8.1	5.0~10.0	1.10	1.10	12.3	1.6	1.31
51	2.0	3.2	2.0~10.0	1.20	1.20	5.0	2.6	1.16
	3.0	4.5	2.0~10.0	1.50	1.50	10.4	2.6	1.19
	5.0	6.5	2.0~10.0	1.45	1.45	15.6	2.6	1.25
	10.0	11.5	2.0~10.0	1.35	1.35	26.0	2.6	1.40
70	2.0	3.2	2.0~10.0	1.20	1.20	10.0	4.9	1.16
	3.0	4.5	2.0~10.0	1.50	1.50	19.0	4.9	1.19
	5.0	7.0	2.0~10.0	1.95	1.95	30.4	4.9	1.25
	10.0	11.9	2.0~10.0	1.85	1.85	55.4	4.9	1.40
	10.0	11.8	20.0	1.80	1.80	55.4	4.9	1.50
	15.0	16.7	20.0	1.70	1.70	78.9	4.9	1.65
100	2.0	3.2	5.0~10.0	1.20	1.20	16.0	6.4	1.16
	3.0	4.5	5.0~10.0	1.50	1.50	23.7	6.4	1.19
	5.0	7.3	5.0~10.0	2.25	2.25	42.2	6.4	1.25
	10.0	12.1	5.0~10.0	2.10	2.10	73.0	6.4	1.40
	15.0	17.0	5.0~10.0	2.00	2.00	103.7	6.4	1.55
	15.0	17.0	20.0	1.95	1.95	103.7	6.4	1.60
	20.0	21.9	25.0	1.85	1.85	136.3	6.4	1.85

표 5.2는 수중발파의 천공지름과 여기에 적당한 벤치 높이를 기입한 것이다. 수중천공 발파시의 표준 장약량은 연암은  $0.5 \text{ kg/m}^3$ , 보통암은  $0.8 \text{ kg/m}^3$ , 경암은  $1.0 \text{ kg/m}^3$ 가 된다.

또한 수중부착 발파시에 연암은  $2.0 \text{ kg/m}^3$ , 보통암은  $3.0 \text{ kg/m}^3$ , 경암은  $4.0 \text{ kg/m}^3$ 가 된다.

표 5.2 수중천공발파의 천공지름과 적당한 벤치의 높이

천공지름( mm )	적당한 벤치의 높이( m )
30	0~3
40	2~5
41	3~8
70	5~15
100	6~20

#### 5.4.2 수중발파용 화약류

수중발파용으로 특별히 제조된 수중발파용 화약류를 사용하여야 한다. 폭약은 수압 때문에 폭굉을 일으키지 않던가, 저속폭굉을 일으킬 때가 있다. 다이너마이트류는 수압  $3\text{ kg/m}^2$  이상인 경우에는 유산바륨을 성분에 더한 후 수중발파용으로 한다.

수중발파에 사용되는 전기뇌관은 관체 및 각선의 내압수압성이 크며, 인접구멍의 발파에 의한 충격압으로 순폭되던가 변형되어 불폭이 안되도록 해야 한다.

도폭선을 수중에서 사용할 때에는 끝 면을 방수캡으로 하고, 도폭선의 접속부는 폭굉 진행 방향에 따른 분기로서, 접속용 기구를 사용하던가 또는 테이프로 잘 묶어 접촉 길이를 10cm 이상으로 한다.

#### 5.4.3 기폭방법

유선기폭, 무선기폭 및 도폭선기폭 등 3가지가 있다.

유선기폭 발파법은 천공대의 폭약포에 장착된 전기뇌관의 각선말단과 발파기 단자를 보조모선 또는 발파모선으로 결선해서 발파기에 의해 기폭하는 것으로, 결선 조작은 신중히 하고, 직병렬 결선을 착오 없이 행하면 작업의 확실성이란 점에서는 가장 신뢰할 수 있는 것이다. 결선 도중에 도통측정을 하면서, 점차 전부의 결선을 하고, 발파직전에 도통을 체크할 수 있으므로 가장 확실한 방법이 된다. 이 방법에 의하면 단발 발파도 할 수 있으나, 조류가 빠른 장소, 수심이 깊은 곳에서는 모선의 절단이나 도통불량, 발파전류의 누설 등의 트러블이 일어나기 쉽다.

무선기폭 발파법은 유선기폭법으로는 발파를 하는 것이 곤란한 장소에서 행하는 방법이다. 초음파형 무선기폭법과 전자유도식 무선기폭법 등이 있다. 초음파형은 초음파 원격조작에 의해 송파기에서의 제 1 신호를 수중에 보내는 초음파신호를 각 소자의 수파기가 받아 이에 의해 스위치가 닫아져서 콘덴서가 충전된다. 전자유도식은 코일과 정류용 다이오드 및 콘덴서로 소자가 구성되어 있다. 루프안테나에 흐르는 교류에 의해 발생하는 자장내에 이 소자를 두면, 소자내 코일에 유도전력이 발생하여, 다이오드를 이용해서 정류하여 콘덴서를 충전하여 기폭된다. 이 때 발파지점을 에워싸듯이 루프안테나를 설치하여야 한다.

도폭선기폭 발파법은 잠수부의 작업이 필요하게 된다. 장공 장약일 때는 폭굉의 전파를 확실하게 하기 위해 장약에 따라 장착되는 것도 유효한 방법이다. 장약이 완료된 후 각 공에서 나오는 도폭선의 단말을 주도폭선과 결선하는 경우와 이들 도폭선의 회로와 유선기폭법이나 무선 기폭법과 결합시켜 발파할 때도 있다.

#### 5.4.4 수중천공발파법

벤치커트발파, 1자유면 파울리기 발파, 무자유면 완화 발파 등이 있다. 육상인 경우의 벤치 발파는 벤치면과 병행해서 2~3열의 장약구멍열을 만들고, 이들을 단발발파에 의해 순차 기폭해 간다. 수중발파에서는 시간차가 많으면 갖가지 장애가 발생되므로, 미국에서는 인접 구멍간의 시간차를 25 ms 이하로 하고 있다.

물 바닥에서 다공열의 벤치커트를 실시할 경우에는 특수한 내압가공한 시차가 25 ms 이하인 MS단발전기뇌관을 이용하던가, 도폭선 딜레이 커넥터(Delay Connector)를 사용한다. 지름 10cm의 장약구멍인 경우 표준적인 천공패턴은 최소저항선 2m, 공간격 3m, 벤치높이 5~7m, 장약량은 암반의 강도나 수심 등에 의해 영향을 받던지 다이너마이트로 0.6~1 kg/m<sup>3</sup>이다. 벤치커트인 경우에는 자유면을 만들어야 하므로 천공, 발파, 버럭 처리라는 사이클로 작업을 진행해야 한다. 1자유면 파울리기 발파는 2m 정도의 간격으로 천공, 천공길이는 2~4m, 약량은 다이너마이트로 0.8~1.5 kg/m<sup>3</sup>, 무자유면 완화 발파는 공간격 2m, 천공길이는 5~7m, 약량은 1~2 kg/m<sup>3</sup>가 되는 방법 등이 있다.

#### 5.4.5 수중발파 실시

수중현수발파를 실시함에 있어 결선부의 전류누설, 폭약의 내수성, 내수압성, 폭약이 매어달린 위치 등을 정확히 알아야 한다. 또한, 발생하는 수중충격압에 의해 수중생물이 어떤 영향을 받게 될는지 조사해 두지 않으면 안 된다.

수중부착발파를 실시하는 것은 굴착깊이도 알고, 천공기계도 없을 때이며, 더욱이, 급속히 실시될 경우가 많다. 암반상의 퇴적층을 제적하고 직접암반과 밀접 시키도록 하는 것이 중요하다. 또한 장약이 수류에 의해 흐르지 않게 하는 것으로 잠수부의 화약류 취급 훈련도 필요하다.

수중천공발파는 발파계획에 따라 필요한 기재를 미리 준비, 각각 순서에 따라 실시한다. 일반적으로 폭약은 수중에 있어서 순폭도가 저하되기 때문에 약포간에 게재물이 없도록 주의해야 하며, 전기뇌관은 2개 이상을 1구멍에 넣을 때가 있고, 천공벽면의 황폐에 의한 영향을 감소시키기 위해 천공벽 내경에 상당한 염화비닐파이프를 삽입하는 방법 등이 행해지고 있다. 약포는 부력에 의해 부상하는 수가 있으므로 주의한다. 결선은 가능한 한 육상 또는 배 위에서 작업해 두는 것이 바람직하다.

#### ◎ OD 공법(Overburden Drilling Method)

이중관식 드릴파이프가 회전천공에 의해, 표토 층을 파 내려가 견고한 암반에 도착하면 회전비트는 그대로 암반 중에 몇 *inch* 밀어 넣어지고, 내관의 회전타격천공이 진행되어 중간관이 발파되어 소정의 심도까지 천공되면 내관은 뽑아지고 대신 플라스틱튜브가 삽입된다. 이어서 외관은 뽑혀서 이것으로 천공이 완성되며, 플라스틱튜브는 연약한 표토층의 붕괴방지, 천공내에 폭약을 장전하는데 사용된다.

#### 5.5 수중충격파

폭약을 수중에 매단 상태로 폭발시키던가(수중현수발파). 아니면 수중부착발파로 해서 수중

의 암반상에 폭약을 놓고 폭발시킨 경우에는 폭약위주의 매질은 모든 것 또는 대부분이 물이므로 폭발에 따라 우선 수중에 충격파가 전파되어 간다. 이어서 생성된 가스구는 수중에서 상승하지만, 이 때 가스구는 가스구 내의 가스압력과 외부에서 가스구에 가해지는 정수압의 크기 및 가스구가 지닌 관성에 의해 결정되는 일정한 관계에 따라 팽창, 수축을 반복하면서 수면을 향해 상승하고 마침내는 대기 중으로 방출된다.

#### 5.5.1 충격파에 의한 영향

물은 비압축성에 가까운 재질을 가진 매질로서, 충격파의 전달이 지상에서보다 더욱 크게 된다. 암반에 천공을 하고 발파를 하는 경우, 많은 양의 에너지가 암반 중으로 전달되어 주로 지반진동을 발생시키지만 암반 표면에 폭약을 부착하여 발파하는 경우에는 수중 충격압이 크게 된다. 수중 발파에 의한 지반 진동이나 충격압의 세기는 인접한 공이 동시에 기폭되는 경우가 일어나기 쉬우므로 예상하지 못한 진동이 발생하기 쉽다.

일반적으로, 암초나 수심이 얇은 곳은 해조류가 번식되고 어류를 증식시키는 양식 어업이 행해지고 있는 곳이 많다. 수중 발파에 의한 충격파는 인접한 수문이나 배수구 구조물에 영향을 줄 수도 있으며, 어패류에도 생물학적으로 영향을 줄 수 있으므로 주위 환경에 대한 조사가 세심하게 이루어져야 한다. 어패류에 대한 구체적인 영향은 조건에 따라 다르게 나타날 것이나 부레가 없는 조개류, 새우와 같은 어류는 수중 파동에 대한 내성이 강하고, 부레가 발달한 잉어와 같은 어류는 회복이 어려운 손상을 받기 쉬운 것으로 관찰되고 있다.

#### 5.5.2 충격파의 제어

수중충격압을 억제한다는 것은 **안전과 공해** 측면에서 중요한 일이며, 수중발파에 의한 영향 때문에 주어지는 피해를 적게 하려는 의도에서 고려되었다. 충격압을 제어하는 방법으로는 **폭원에서 제어하는 것과 폭원에서 떨어진 임의의 장소에서 제어하는 것**이 있다.

폭원에서 제어하기 위해서는 적절한 발파를 함으로써 1회의 폭약량을 되도록 적게 해서 발파를 효과적으로 하기 위해 단발발파를 하면 좋고, 수중지발뇌관, 수중 MS Connector 혹은 타이머를 사용한 발파를 실시하여 발파에 의한 필요 이상의 피해를 주지 않도록 하는 것이 중요하다.

폭원에서 분리된 임의의 장소에서 제어하기 위해서는 에어버블커텐이나 드라이아이스커텐 등의 기포를 수중에 치는 것과 완충재에 의한 방호막을 형성시키는 방법이다. 에어버블커텐에 의한 방법은 실용적으로 쓰이고 있으며 그 효과는 입사압력의 크기, 입사압력의 파형, 기포의 크기, 버블의 밀도, 버블층의 두께 등의 인자에 의해 지배되지만 이들은 폭원과의 거리나 폭력 등과 상관관계가 있다. 실험적으로는 에어버블커텐 내외에서 충격압의 1/2~1/20 정도의 감소효과가 얻어지고 있다. 단, 기포에 의한 방법일 경우에는 수직방향에만 방호벽이 가능한 것이다. 한편 발포 스킨, 발포 폴리에치렌, 발포 콘크리트 등의 완충재에 의한 방호막은 임의 방향의 방호작용이 가능하지만 일단 완충재가 파손되면 사용 불가능하다.



## 단원 정리

---

### 1. 비장약량

$$\text{경사공} = 1.0 + 0.01 \times \text{수심}(m) + 0.02 \times \text{진흙두께}(m) + 0.03 \times \text{계단높이}(m)$$

$$\text{수직공} = 1.1 + 0.01 \times \text{수심}(m) + 0.02 \times \text{진흙두께}(m) + 0.03 \times \text{계단높이}(m)$$

### 2. 공간격

$$S(\text{공간격}) = B(\text{최소저항선}) = U(\text{sub-drilling})$$

### 3. 천공장, 무장약장 공식

$$L = H + U \quad (L \text{은 최소한 } 0.5m \text{ 이상으로 한다.})$$

$$h_o = B/3$$

$L$  : 천공장

$h_o$  : 무장약공장

$U$ : *sub-drilling*