

에멀전폭약의 내충격 특성

이 영호, 이 승찬, 이 응소, 윤 종화
(주)한화

1. 서 론

초안폭약, ANFO, 함수폭약(슬러리 및 에멀전)과 같이 화학적 예감제가 적거나 없는 폭약들은 발파현장에서 인접공의 충격압력에 의해서 위력이 저하되거나 사압되어 잔류약이 발생하는 문제점이 자주 나타난다. 이것으로 인하여 발파효율이 저하되는 것은 물론, 후속공정의 작업지연 및 안전작업에 큰 문제점을 초래할 수 있다. 폭약의 위력저하 및 사압에 의한 잔류약 발생의 외부 요인으로는 다음과 같다.

- 먼저 기폭된 발파공의 충격압력
(Transient shock pressure)
- 먼저 기폭된 발파공의 가스압력
(Gas pressure)
- 워터 햄머 효과(Water hammer effect)
- 측벽 효과(Channel effect)

지연 시차를 이용한 발파에서 먼저 기폭된 발파공의 충격압력은 아직 기폭되지 않은 발파공의 폭약에 영향을 주어 위력 저하 및 잔류약을 발생시킨다. 이것에 대한 기본 메커니즘은 폭약이 어떤 압력(동적인 또는 정적인)을 받을 때 압축이 되면서 폭약내의 공기가 빠져 나가 비중이 높아지고 감도가 저하되는 것으로 설명할 수 있다. GMB(Glass Micro Balloon)로 예감화한 에멀전폭약의 경우에도 이 외부충격에 의해서 핫스팟(Hot Spot) 역할을 하는 GMB가 파괴되어 가스가 빠져 나가고 비중이 높아져 감도가 저하된다. 젤라틴다이아마이트의 경우에는 이 외부충격에 의해 비중이 높아지긴 하지만 니트로글리세린(또는 니트로글리콜)이라고 하는 화학적 예감제가 감도 저하를 막아주기 때문에 비교적 잘 견딘다고 할 수 있다.

암반중의 충격파는 약 2km/sec의 속도로 진행되며 약 1ms 이내에 인접공의 폭약에 도달하여 영향을 주게 된다.(1) 이 충격압력은 공경 64mm에 에멀전폭약을 밀장전하였을 때 22cm의 거리에서 약 50MPa 이상이 되며 거리에 따라 급격히 감소하여 100cm에서는 약 1MPa 정도로 된다.(2) 따라서 근접된 공간격에서 폭약이 약 1ms 동안 지속되는 순간적인 충격압력(Transient shock pressure)(3)을 받으면 압축되어 위력이 저하되고 최악의 경우에는 사압되어 잔류될 수가 있다.

특히 암반내에 크랙이 존재하거나, 그 틈에 물이 차게 되면 공간격이 넓어도 가스압력의 영향

및 워터 햄머 효과에 의해서 사압되어 잔류약이 발생할 수 있다. 또한 뇌관도 이러한 외부 압력의 영향으로 순폭, 불폭, 위력저하, 지연초시 변화 등을 일으키게 되며 폭약이 잔류하게 되는 다른 또 하나의 원인이 되고 있다.(4)

또한 잔류약은 발파공내의 측벽효과로 부터도 발생할 수 있다. 폭약이 충전된 공내에서 먼저 기폭된 폭약층에서 발생하는 충격파(플라즈마라고도 함.)가 폭약이 채워지지 않은 공기층을 따라 선행되고(폭약의 속도보다 약 500-1000m/sec 빠름) 미반응 폭약층을 압축시켜 감도저하 및 최악의 경우 사압되어 잔류약을 발생시킨다.(5) 폭약이 잔류되기 전까지는 위력저하(Weak detonation)과정을 겪게 되는데 폭광이 되더라도 폭속이 많이 저하되어 있고 완전한 화학반응이 일어나지 않기 때문에 NOx 등의 후가스를 발생시키게 된다.

측벽효과(Channel Effect)외의 3 가지 요인에 의한 불폭 메커니즘은 공간격과 지연시차에 좌우된다. 2ms 이하의 짧은 지연시차에서는 먼저기폭된 발파공의 충격압력을 충분히 받기 전에 발파되기 때문에 문제가 발생하지 않으나, 지연시차가 이보다 길면 폭약을 압축하여 사압, 잔류약을 발생시킨다.

따라서 발파설계를 잘 하기 위해서는 사용하고자 하는 폭약의 특성을 잘 이해하고 설계에 반영하여야 할 것이다. 다음은 폭약의 잔류약 발생을 방지하기 위하여 검토하여야 할 주요 요소들이다.

- 폭약의 특성(발파에 적합한 폭약인지 검토)
- 뇌관의 특성(발파에 적합한 뇌관인지 검토)
- 발파 패턴(공간격, 공경, 공길이, 지연시간 등)
- 암반의 특성

본 논문에서는 4 가지의 실험이 진행되었다.

첫째는 수중에서의 거리에 따른 충격압력의 크기를 압전센서(Piezo sensor)와 오실로스코프(Oscilloscope)로 측정하여 압력감쇄식을 구하였고 에멀전폭약으로 공경 64mm 에 밀장전한 암반중에서의 압력감쇄식(2)을 공경 32mm 에 밀장전하였을 경우의 압력감쇄식으로 변경하였다. 수중과 암반중에서의 압력감쇄식을 비교하여 그래프로 나타내고 수중 한계폭발거리(3 회 시험하여 모두 기폭되는 거리)를 암반중의 한계폭발거리로 환산할 수 있도록 하였다.

둘째는 에멀전폭약과 젤라틴다이 나마이트에 대하여 지연시차에 따른 수중 한계폭발거리를 실험적으로 구하여 암반중의 한계폭발거리로 환산하였다.

셋째는 20ms 의 지연시차 발파에서 거리에 따른 수중 폭발속도를 측정하여 잔류약이 발생하는 거리부터 정상폭속이 되는 거리까지의 폭속변화를 그래프로 나타내고 그로부터 폭속의 위력저하(Desensitization) 영역을 도출하였다.

넷째는 120cm 와 40cm 의 거리에서 지연시차에 따른 폭속의 변화를 살펴보고 수중 충격압력과 가스압력의 영향이 시간에 따라 어떻게 나타나는지 알아 보았다.

다섯째는 두번째에서 구한 암반중의 한계폭발거리가 실제로 일치하는지를 현장시험발파를 통하여 확인하여 보았다.

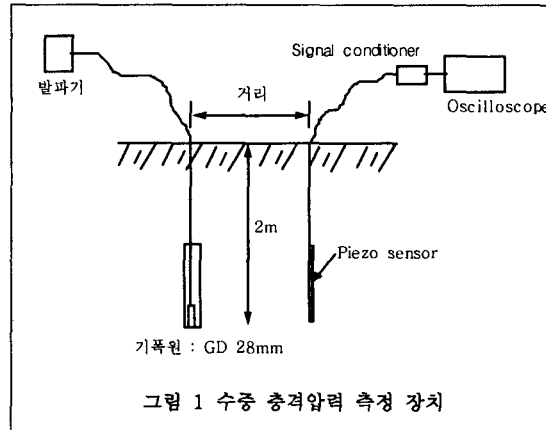
수중기폭시험에서 먼저 기폭되는 폭약의 성능을 일정하게 하기 위하여 약경 28mm 젤라틴다이 나마이트(125g/본)를 사용하였고 충격을 받는 쪽의 폭약은 GMB 로 예감화한 약경 32mm 에멀전폭약(250g/본) 및 약경 32mm 젤라틴다이 나마이트(375g/본)를 사용하였다. 수심 2m 의 깊이에서 시험을 하였으며 뇌관이 받는 충격영향을 배제하기 위하여 보호관을 씌웠다.

2. 시험장치 및 시험방법

2.1. 수중폭발거리에 따른 충격압력의 측정

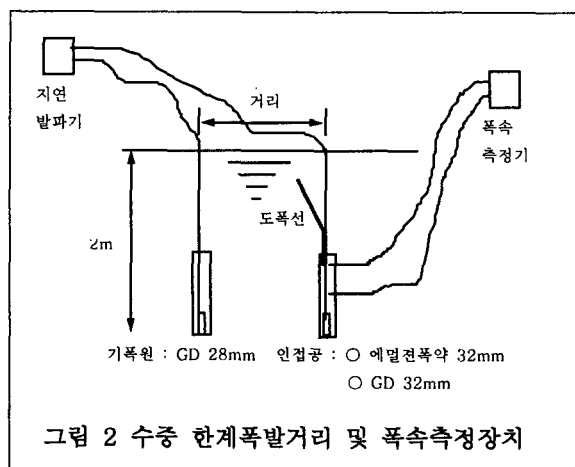
그림 1 과 같이 기폭원(Doner)의 폭약은 약경 28mm 젤라틴다이나마이트를 사용하였고 그의 충격압력을 PCB 사의 Piezo sensor(W138A10), Signal Conditioner(482A16) 및 HP 사의 Oscilloscope(54510A)를 사용하여 측정하였다.

사용된 수조의 크기는 가로,세로,깊이가 각각 6m,6m,4m 이었고 측정깊이는 2m 에서 실시하였다.



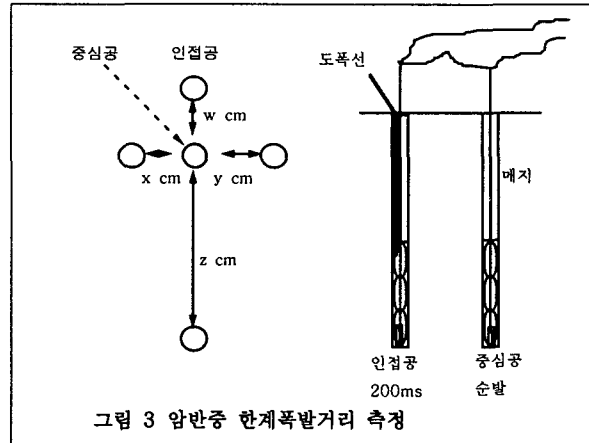
2.2. 지연시간에 따른 수중 한계폭발거리 및 폭속 측정

그림 2 와 같이 기폭원(Doner)의 폭약은 약경 28mm 젤라틴다이나마이트를 사용하였고 그의 폭발 충격압력을 받는 인접공(Acceptor)의 폭약은 직경 32mm 에멀전폭약 및 약경 32mm 젤라틴다이나마이트를 사용하였다. 뇌관은 모두 순발로 역기폭을 하였고 지연발파기를 이용하여 지연시차를 임의로 조정하였다. 인접공의 뇌관은 충격압력에 의한 영향을 배제하기 위하여 보호관을 씌웠다. 인접공 폭약의 폭속은 Instantel 사 VOD PROBE(Serial No. 0015)를 사용하여 측정하였다. 또한 인접공의 불폭여부를 판단하기 위한 방법으로 10g/m 도폭선을 사용하여 감지하였다..



2.3. 암반에서의 시험발파

2001년 3월 29일부터 3월 31일에 걸쳐 변성화강암 지대인 서해안 고속도로 OO현장의 협조로 시험을 실시하였으며 공경은 34mm, 공장은 1200mm 이었다. 인접공(Acceptor) 폭약의 완폭여부는 도폭선으로 감지하였다. 도폭선이 잔류되면 폭약이 불폭된 것으로 간주하였다. 중심공(Doner) 폭약과 인접공(Acceptor)의 폭약은 동일한 폭약인 약경 32mm 에멀전폭약과 약경 32mm 젤라틴다이나마이트를 사용하였다. 중심공으로부터 인접공까지의 거리는 20cm 에서 100cm 로 변화를 주었고 지연시차는 200ms로 하였다.



3. 시험결과 및 고찰

3.1. 폭발거리에 따른 충격압력

3.1.1. 수중 폭발압력 측정

인접공에 걸리는 충격압력을 압전센서를 이용하여 오실로스코프로 압력을 측정한 결과의 한 예는 그림 4와 같았다. 가로축은 시간(μ s)이고 세로축은 mV 이다. 센서의 감도는 2psi/mV 이다. 그림에서 첫번째 피크(Peak)는 동적에너지를 나타내는 충격압력파(Shock pulse)를 나타내며 두번

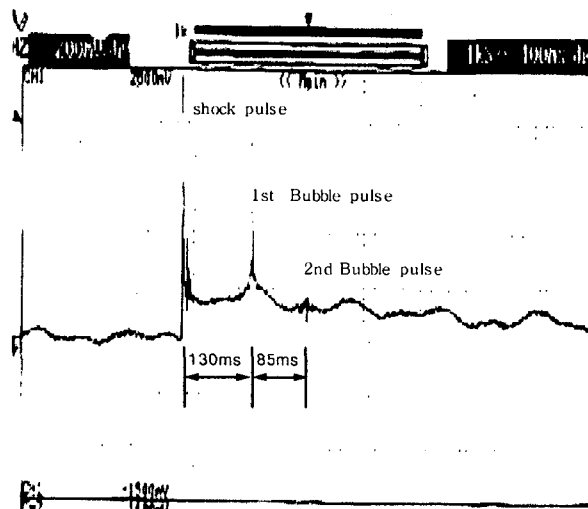


그림 4 수중폭발 압력 측정 기록지

째 및 세번째 피크는 정적에너지를 나타내는 가스압력파(Bubble pulse)을 나타낸다. 충격압력파가 발생한지 약 130ms 후에 첫번째 가스압력파가 생기며 약 215ms 후에 두번째 가스압력파가 나타난다. 거리에 따른 충격압력파(Shock pulse)의 측정 데이터는 다음의 표 1 과 같았다.

R(m)	mV	Pressure		R(m)	mV	Pressure	
		Psi	MPa			Psi	MPa
0.3	288	576	3.92	0.7	69	138	0.94
0.4	220	440	2.99	0.8	51	102	0.69
0.5	170	340	2.31	0.9	50	100	0.68
0.6	96	192	1.31	1.0	47	94	0.64

표 1 거리에 따른 충격압력 시험 데이터

3.1.2. 거리에 따른 수중충격압력의 감쇄식

수중 거리에 따른 충격 압력식은 Kirkwood-Bethe의 식으로 부터 (6)

$$P = K(W^{1/3} / R)^n$$

으로 나타내어진다. 여기에서 P는 압력, K는 상수, W는 폭약량, R은 폭원으로부터의 거리이다. 약량은 125g으로 일정하게 하였으므로 위식을 간단히 표현하면,

$$P = CR^m$$

으로 나타낼 수 있다. P는 Mega pascal, R은 meters 이다. 표 1의 Data를 Log-Log scale로 직선회귀식을 구하여 C값과 m값을 구하면, 각각 C=0.567, m=-1.708가 되므로

$$P = 0.567R^{-1.708}$$

이 된다. 충격압력은 거리에 따라 급격히 감소된다. 예를들어 0.2m에서 8.86 MPa이며, 1m에서는 0.57MPa으로 급격히 감소됨을 알 수 있다.

3.1.3 수중 충격압력과 암반중 충격압력의 비교

참고문헌(13)으로 부터 공경 64mm 에 에멀전폭약으로 밀장전한 암반중의 거리에 따른 충격압력은

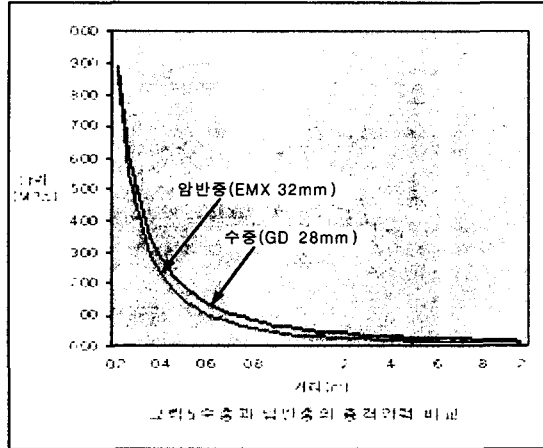
$$P = 0.91R^{-1.95}$$

이다. 여기에서 압력 P는 Mega pascal, 거리 R은 meters 이다. 상기의 식은 Swedish Detonic Research Foundation의 Shulin Nie에 의해서 만들어진 실험식이며, 여기에서의 시험체는 QUARTZ PORPHYRY TYPE의 암석이고 공경은 64mm, 공장은 2~4m, 폭약은 밀장전이 가능한 벌크에멀전폭약으로 부스타는 25g의 플라스틱 PETN으로 역기폭하였다.

공경 64mm 일때의 식을 공경 32mm의 경우로 나타내어 보면, 약량이 1/4이므로 Kirkwood-Bethe의 식으로부터 충격압력은 약량의 n/3에 비례하므로 이를 식으로 나타내면

$$P2 = 0.37R^{-1.95}$$

가 되며 식들을 그래프로 비교하여 나타내면 그림 5와 같이 된다.



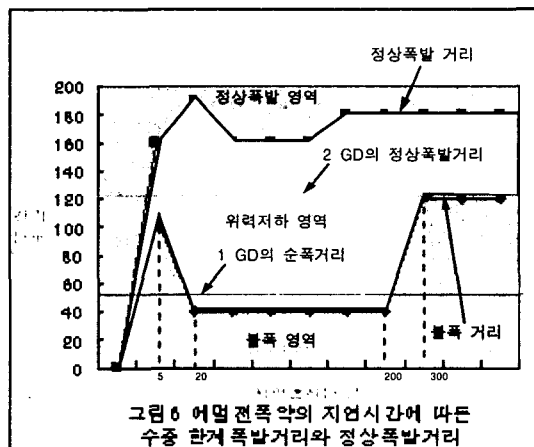
3.1.4 고찰

동일거리에서의 암반충격압력은 수중에서의 충격압력보다 항상 낮으며 감쇄하는 정도도 수중에서 보다 빠르게 감소되는 것을 알 수 있다. 수중 30cm 거리에서의 압력 4.43MPa 은 암반 28cm로 비슷한 거리에서 나타나지만 수중 100cm 거리에서의 압력 0.57MPa 은 암반 80cm로 거리 차이가 더욱 벌어지고 있다.

그림 4 에서 충격압력파는 1ms 이내에 인접공에 도달하고 약 130ms 후에 1 차 가스압력파가 약 215ms 후에 차 가스압력파가 각각 도달된다. 이 의미는 130ms 이내의 지연시차에서는 충격압력만 받지만 그 이상에서는 가스압력까지 받는다는 것을 의미한다. 폭약이 충격압력을 받아 GMB 가 파괴되는 시간을 감안한다면 좀더 시간이 길 것으로 판단되며 시험결과로서는 약 200ms 이후부터 영향을 받는 것으로 나타났으며 이 영역을 컷오프(Cut Off)가 시작되는 영역으로 볼 수 있다.

3.2. 지연시차에 따른 한계폭발거리와 폭속 3.2.1 수중 한계폭발거리와 정상폭발거리

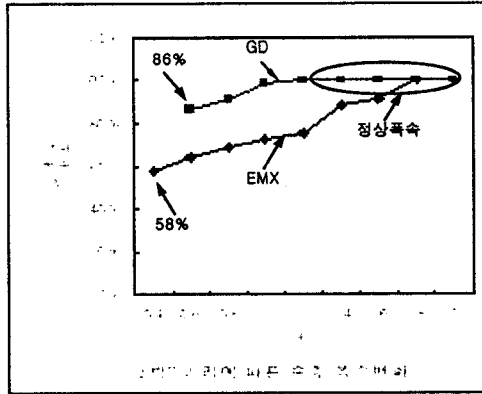
에멀전폭약의 지연시차에 따른 수중 한계폭발거리와 정상폭발거리는 그림 6 와 같았다. 한계폭



발거리와 정상폭발거리 사이의 영역은 폭광은 되지만 폭속의 위력이 저하되는 영역 (Desensitization zone)이다. 선 1은 젤라틴다이내마이트의 순폭거리이고 선 2는 정상폭발거리를 나타낸다.

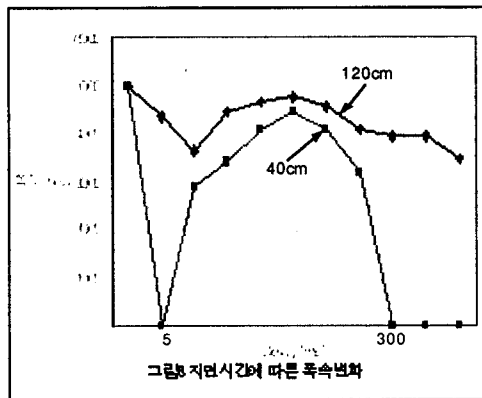
3.2.2. 거리에 따른 수중 폭속변화

지연시차 20ms인 경우, 수중 거리에 따른 상대폭속의 변화는 그림 7과 같았다. 1은 에멀전폭약을, 2는 젤라틴다이내마이트의 경우를 나타내고 있다.



3.2.3. 지연시차에 따른 수중 폭속변화

에멀전폭약의 수중 거리 40cm와 120cm에서 지연시차에 따른 폭속의 변화는 그림 8과 같았다.



3.2.3. 고찰

20~200ms의 지연시차로 발파시에는 폭광이 겨우 유지되는 한계충격압력이 2.71MPa(수중 40cm, 암반중 36cm의 거리에 해당), 정상폭속이 유지되는 충격압력이 0.21MPa(수중 180cm, 암반중 135cm의 거리에 해당)로 나타났으며 300ms의 지연시차로 발파시에는 한계충격압력이 0.42MPa(수중 120cm, 암반중 94cm의 거리에 해당), 정상폭속이 유지되는 충격압력이 0.21MPa로 20~200ms의 지연시차 발파와 동일하게 나타났다. 그림 6으로부터 5ms에서 수중 한계폭발거리가 110cm이었던 것이 20~200ms 사이에서 40cm로 가까워지고 300ms 이상에서 120cm로 다시 멀어지는 이유는 그림 8로부터 5ms에서는 약 1ms 후에 도달되는 충격압력을 받아 GMB(Glass Micro Balloon)가 압축, 파괴되고 가스가 압축된 상태에서는 핫스팟(Hot spot)

의 역할을 못하여 불폭 및 위력이 저하되지만, 20~200ms 에서는 GMB 가 깨지고 GMB 내부에 있던 가스가 일시적으로 다시 회복되어 핫스포트의 역할을 하여 기폭성 및 위력이 증가한다. 그러나 300ms 이상에서는 130ms 이후에 나타나는 1 차 및 2 차 가스압력파에 의하여 폭약내의 가스가 외부로 방출되어 없어지기 때문에 다시 불폭 및 위력저하가 된다.

젤라틴다이아마이트에서는 불폭 영역이 없었고 모든 지연시차에서 1.85MPa(수중 50cm, 암반중 44cm 의 거리에 해당) 이상에서는 순폭이 되었고 0.42MPa(수중 120cm, 암반중 94cm)이하에서는 정상폭속을 나타내었다. 폭속위력저하의 정도는 그림 7 로부터 에멀전폭약의 경우는 최소 정상폭속의 58%까지 저하되지만 젤라틴다이아마이트의 경우는 최소 정상폭속의 86%까지 저하되고 있어 폭속위력감소의 정도도 에멀전폭약이 젤라틴다이아마이트에 비해 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3. 암반에서의 시험발파

3.3.1. 암반에서의 거리별 폭발시험

에멀전폭약과 젤라틴다이아마이트를 암반에서 시험한 결과를 표 2 에 나타내었다.

공간격 (cm)	불폭수/시험수	
	에멀전폭약	젤라틴다이아마이트
20	5/7	0/6
30	3/6	0/6
40	0/6	0/6
50	0/2	-
60	0/2	-
70	0/2	-
100	0/2	-

표2 암반에서의 거리별 폭발시험

3.3.2. 고찰

에멀전폭약의 경우 거리가 40cm 이상에서는 완폭이 되고 30cm 이하에서는 불폭이 발생하였다. 3.2.에서 예측한 암반중의 한계폭발거리 36cm 와 거의 일치한다. 그러나 젤라틴다이아마이트의 경우는 20cm 에서도 불폭이 나타나지 않고 있으며 이것 또한 수중시험 결과와 거의 일치하고 있다.

4. 결 론

- 동일 거리에서의 암반중의 충격압력은 수중에서의 충격압력보다 항상 낮으며 감쇄정도도 수중에서보다 빠르다.
- 충격압력은 약 1ms 후에 인접공에 도달하며 1 차가스압력파(1'st bubble pulse)는 약 130ms 후에, 2 차가스압력파(2'nd bubble pulse)는 약 215ms 후에 도달한다.
- 20~200ms 의 지연시차 발파시에 예감제를 GMB 로 사용하는 에멀전 폭약은 2.71MPa(수중 40cm, 암반중 36cm 의 거리에 해당)이하의 충격압력에서 잔류되지 않으므로 공간격을 36cm

이상 유지해야만 불폭을 방지할 수 있다고 판단된다.

- 300ms 이상의 지연시차 발파시에는 0.42MPa(수중 120cm, 암반중 94cm 에 해당) 이하의 충격압력에서 잔류되지 않으므로 공간격을 94cm 이상 유지해야만 불폭을 방지할 수 있다고 판단된다. 이 영역에서는 충격압력파 외에 가스압력파가 작용하기 때문에 한계폭발거리가 멀게 나타난다고 판단된다.
- 젤라틴다이ना마이트의 경우 모든 지연시차에서 1.85MPa 이상에서 순폭이 발생하였으며 불폭은 발생되지 않았다 니트로글리세린(또는 니트로글리콜)이라고 하는 예감제가 내충격성을 강화시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.
- 위력저하영역에서의 폭속위력정도는 에멀전폭약이 최소 정상폭속의 58%까지 젤라틴다이ना마이트의 경우는 최소 정상폭속의 86%까지 위력이 저하되며 이는 에멀전폭약이 위력저하의 정도를 더 심하게 겪는것으로 판단된다.
- GMB 로 예감화한 에멀전폭약의 경우 지연시차를 지나치게 짧게 하거나(20ms 미만) 지나치게 길게 하면(300ms 이상) 불폭의 가능성이 더욱더 높아지므로 가능한 20~200ms 의 지연시차로 발파하는 것이 유리하다고 판단된다.
- 따라서 공간격이 40cm 이하로 유지되는 터널 등의 심배기 발파에서 에멀전폭약을 사용할 경우 심한 위력저하 및 불폭이 발생하여 발파효율이 급격하게 저하되므로 이러한 짧은 공간격의 발파에서는 반드시 젤라틴다이ना마이트의 사용이 권장되며 GMB 로 예감화한 에멀전폭약은 공간격이 비교적 넓은 노천발파에 사용하는 것이 적당할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Wieland, M. S. : The Laboratory Determination of Dynamic Pressure Of Cap-Sensitive explosives., Proc. 16th Conf. Explosives and Blasting Technique, SEE, Solon, OH, Feb, 1990.
- (2) Nie, S. 1993. : Dead-pressing phenomenon in emulsion explosives Proceedings of the 9th Blasting Research Symposium, SEE, San Diego, California, U.S.A. Feb. 2, 1993.
- (3) Wieland, M. S. : The Desensitization And Malfunction of Coal-Mine Explosives. Proc. 13th Conf. Explosives and Blasting Technique, SEE, Solon, OH, Feb, 1987.
- (4) Wieland, M. S. : Cross Borehole Stress Wave Measurements in Underground Coal. SEE, Anaheim, California. 1988.
- (5) Fumihiko SUMIYA : Effect of Surface Roughness of Charge Hole on Detonation Propagation of Emulsion Explosive. Proc. 22th Conf. Explosives and Blasting Technique, SEE, Orlando, Florida, U.S.A Feb. 1996.
- (6) Matsuzawa T, et al : Detonability of Emulsion Explosives under Various Pressures. Journal of the Industrial Explosives Society, Japan. Vol.43, No.5. 1982.