

에멀전 폭약의 내충격성 연구(II)

이영호¹⁾, 이승찬¹⁾, 이용소¹⁾, 김문태¹⁾

1. 서 론

터널발파에서와 같이 다양한 뇌관을 사용하는 경우에 발생하는 사압 현상에 대하여 2001년 발표한 에멀전 폭약 내충격 특성 연구 결과 공 간격 40cm 미만에서는 반드시 젤라틴 다이내마이트나 심발용 특수폭약을 사용하도록 권고하였다. 하지만 같은 뇌관 지연 초시를 가진 공에서도 사압 현상이 발생하여 현상 및 원인에 대하여 뇌관을 포함하여 다각도로 불폭 발생 가능성에 대한 시험을 실시하였다. 먼저 기폭 된 폭약에서 발생한 폭발 충격 압력을 받았을 때 뇌관의 기폭성능 및 초시가 어떻게 변화하는지를 평가하였으며 뇌관 위력에 따른 내충격성 변화 및 점화 전류의 크기에 따라 같은 단수인 뇌관의 초시편차를 정밀하게 평가하였다. 그 결과를 바탕으로 10ms이하 뇌관 초시 편차에서의 내충격성을 평가하였다.

2. 시험방법

2.1 폭발 충격 압력(Dynamic pressure)이 뇌관에 미치는 영향 평가 시험

이 시험은 먼저 기폭 된 발파공의 폭약에서 발생한 충격압력을 받은 뇌관의 기폭능력이 어떻게 변화되는지를 평가하기 위하여 실시하였다. 즉 우리가 기존에 평가하였던 폭약의 내충격성능이 충격압력을 받은 뇌관의 기폭능력의 변화에 의한 것인지를 확인하기 위하여 실시하였다.

본 시험에 사용한 전기뇌관은 (주)한화에서 생산되는 전기뇌관과 수중 내충격 시험 장치를 이용하였다. 그림 1과 같이 기폭원(Doner)의 폭약은 약경 28mm 젤라틴 다이내마이트 1본(125g)을 사용하였고 그의 폭발 충격압을 받는 인접공(Acceptor)은 일반 에멀전 폭약 32mm 1본(250g)에 시료뇌관을 삽입하여 수중에 장착한 후 기폭원을 기폭 시켰다. 이 후 인접공 에멀전 폭약을 수중에서 꺼내어 시료뇌관을 얻었다. 시료뇌관은 수중에서 이격거리별로 입수하였으며 입수한 뇌관의 연관시험을 통하여 뇌관의 기폭성 및 위력, 지연초시 변화를 평가하였다. 지연초시는 한화에서 보유하고 있는 뇌관 초시 시험기를 이용하였으며 시험한 전류치는 1A이었다.

1) (주)한화 보은공장

2.2 뇌관 위력 변화에 따른 내충격성 영향 평가 시험

이 시험은 수중 내충격성 평가에 있어서 뇌관의 위력이 폭약의 내충격 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실시하였다.

그림 2와 같이 기폭원(Doner)의 폭약은 약경 28mm 젤라틴 다이ना마이트 1본(125g)을 사용하였고 그의 폭발 충격압을 받는 인접공(Acceptor)은 일반 에멀전 폭약 32mm 1본(250g)에 한화에서 생산하고 있는 200ms 지연초시를 가진 시료뇌관을 삽입하여 수중에 장착한 후 8호 전기뇌관을 이용하여 기폭원을 기폭시켜 인접공 에멀전 폭약의 기폭 유무를 거리별로 확인하여 수중 한계폭발거리를 측정하였다. 시료뇌관은 (주)한화에서 생산하는 4호, 6호, 8호 뇌관, 본 시험용으로 제조한 10호뇌관과 20g 젤라틴 다이나마이트 부스타(Booster)와 8호뇌관을 결합한 것을 사용하였다.

뇌관은 모두 순발로 역기폭을 하였고 인접공의 불폭 여부를 판단하기 위한 방법으로 10g/m 도폭선을 사용하여 감지하였다.

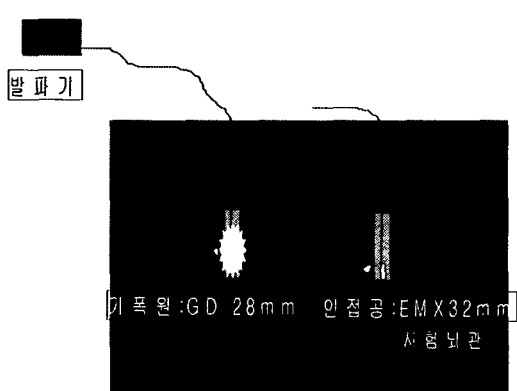


그림 1. 뇌관 수중 충격 시험 장치

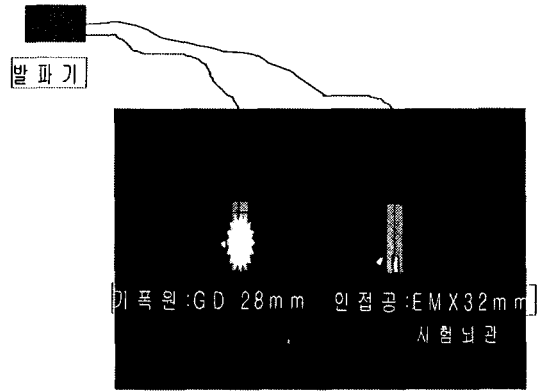


그림 2. 수중 내충격 시험장치

2.3 뇌관 점화 전류치 변화에 따른 초시편차 평가 시험

이 시험은 동일 초시의 뇌관을 사용한 발파공에서 발생할 수 있는 초시편차를 조사하기 위하여 실시하였다. 즉 발파현장에서 발생할 수 있는 발파기의 점화 전류의 대소에 따라 발생할 수 있는 초시범위를 평가하였다.

본 시험 장치는 한화에서 보유하고 있는 뇌관 초시 시험기를 이용하였으며 시험한 전류치는 0.6A, 1A, 3A이었다.

2.4 소규모 초시편차에서의 내충격 시험

통상 에멀전폭약의 내충격성 평가는 10ms이상에 대해서만 평가를 실시하는데 이 시험에서는 발파에서 동일 지연초시를 가진 발파공에서 발생할 수 있는 초시 편차 중 10ms이하에서의 수중 내충격성을 평가하였다.

그림 2와 같이 기폭원(Doner)의 폭약은 약경 28mm 젤라틴 다이내마이트 1본(125g)을 사용하였고 그의 폭발 충격압을 받는 인접공(Acceptor)은 시료 에멀전폭약 32mm 1본(250g)을 사용하였다. 뇌관은 모두 순발로 역기폭을 하였고 지연발파기를 이용하여 지연시차를 임의로 조정하였다. 인접공의 뇌관은 충격압력에 대한 영향을 배제하기 위하여 보호관을 씌웠다. 인접공의 불폭 여부를 판단하기 위한 방법으로 10g/m 도폭선을 사용하여 감지하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 폭발 충격압력이 뇌관에 미치는 영향 평가

에멀전 폭약 내충격 특성 연구 논문에서 에멀전폭약은 발파압력에 의한 영향을 많이 받으며 이것을 예방하기 위하여 심발용 특수폭약을 사용하도록 권고하였다. 하지만 발파설계 및 실제 발파에서 뇌관은 발파의 안전성, 효율 등에 큰 영향을 미치며 폭약의 폭발에 의한 동적압력의 영향으로 발파 실패가 발생할 수도 있다고 알려져 있다. Christopher의 시험결과를 보면 폭발로 발생한 정수압적인 압력이 뇌관에 영향을 미치는 것으로 확인되었는데 가해지는 동적압력과 정도의 따라 순폭, 비교에너지 감소, 지연초시 변화 등의 현상이 나타난다고 하였다(ISEE 2006). 인접공에서 발생한 충격압력을 받은 뇌관에 대하여 기폭성 및 위력을 평가한 결과를 표 1, 표 2에 나타내었다.

표 1의 시험 결과에 의하면 수중 충격압을 받은 뇌관의 경우 수중이격거리 0.3m까지 기폭성능의 문제점은 나타나지 않았다. 즉 외관의 손상은 수중이격거리 1m까지 나타나지 않았으며 그 이하에서는 외관이 손상되었다. 기폭력은 연관 최소 관통경으로 보았을 때 다소의 차이가 발생하였으나 8호뇌관 기폭력 규격 이상의 성능을 나타내었다. 다만 수중이격거리 0.2m이하로 근접시켰을 때에는 순폭이 발생하였다. 따라서 2001년에서 측정된 수중충격압력에 의하면 3.92 MPa 이상 즉 압반 28cm이상에서는 기폭 성능의 문제는 발생하지 않는 것으로 보인다. 또한 수중 1m이내 혹은 압중 0.8m이내의 경우 뇌관의 외형 손상이 크므로 관체 파손에 의한 수분 유입이나 점화에너지 및 지연제 전달력 부족에 의한 기폭 실패도 예상된다. 또한 수중 내충격을 받은 뇌관은 Christopher에 의하면 전체적으로 지연초시가 빨라지는 현상을 보인다고 하였다(ISEE 2006).

동적압력을 받은 뇌관의 초시시험 결과를 표 3에 나타내었는데 이 시험결과를 보면 0.57 MPa의 동적 압력을 받은 뇌관의 경우 초시는 상당히 빨라지고 초시범위는 넓어지는 경향을 보이고 있다. 수중이격거리 1.0m인 경우 압중에서는 0.8m이므로 이것으로 볼 때 실제 발파에서 공간적 0.8m이내일 경우 전공에서의 발파 충격압을 받은 인접공의 뇌관 초시는 빨

라지고 범위는 넓어지므로 다양한 초시범위의 폭약 내충격성 평가가 필요하며 여러 단수의 뇌관과 수중이격거리를 다양하게 하여 뇌관 내충격시험을 실시, 내충격을 받은 뇌관의 영향을 정밀 평가하는 것이 필요할 것으로 보여진다.

표 1. 동적 압력을 받은 뇌관의 기폭 시험 결과

| 이격거리(m) | Dynamic Pressure에 노출 후 뇌관 외관 | 연관 최소 관 통경(mm) | 비고 |
|---------|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| 3.0 | 외관 변화없음 | 12.16 | 참고) 연관관통규격 : 10mm이상 |
| 2.5 | 외관 변화없음 | 12.27 | |
| 2.0 | 외관 변화없음 | 12.09 | |
| 1.5 | 외관 변화없음 | 12.10 | |
| 1.0 | 외관 변화없음 | 12.11 | |
| 0.5 | 공간장 부분 찌그러짐 | 11.70 | |
| 0.4 | 공간장 부분 심하게 찌그러짐 | 11.80 | |
| 0.3 | 공간장 부분 심하게 찌그러짐 | 11.92 | |
| 0.2 | 순폭 | | |
| 0.1 | 순폭 | | |

표 2. 동적 압력을 받은 뇌관의 기폭 시험 결과 사진

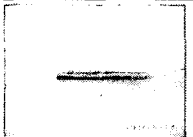



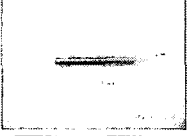

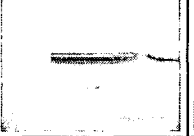


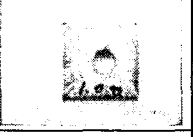
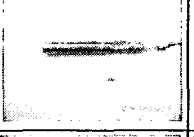

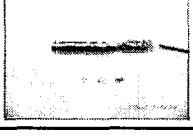

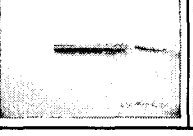

| 이격거리 (m) | Dynamic Pressure 노출 뇌관 외관 사진 | 연관 관통 사진 | 이격거리 (m) | Dynamic Pressure 노출 뇌관 외관 사진 | 연관 관통 사진 |
|-------------|---|---|-------------|--|---|
| 3.0 |  |  | 2.5 |  |  |
| 2.0 |  |  | 1.5 |  |  |
| 1.0 |  |  | 0.5 |  |  |
| 0.4 |  |  | 0.3 |  |  |

표 3. 동적 압력을 받은 뇌관의 초시 시험 결과 (수중이격거리 : 1.0m)

| 뇌관 종류 | 기준 초시(ms) | 초시범위(ms) | 시험뇌관 초시시험 결과(ms) | 비고 |
|--------|-----------|----------|-------------------------|----------|
| MS-5단 | 100 | 91~110 | 46, 47, 48, 61, 82 | 시료수 : 5종 |
| MS-10단 | 200 | 191~210 | 56, 58, 84 | 시료수 : 3종 |
| MS-13단 | 260 | 251~270 | 157, 157, 166, 166, 170 | 시료수 : 5종 |

3.2 뇌관 위력 변화에 따른 내충격성 영향

통상 에멀전 폭약은 폭발 충격압력을 받으면 폭약 내 포함되어 있는 예감제인 버블(Bubble, Hot spot)이 파괴되어 에멀전 폭약의 가비중(Bulk density)이 증가, 감도를 잃어 뇌관의 기폭력에도 폭약이 전폭되지 않는 사압 현상이 발생한다. 본 시험에서는 뇌관의 침장약량을 변화시켜 수중 내충격성에 대한 평가를 실시하였다. 뇌관의 침장약량이 증가하면 뇌관의 기폭력이 증가되어 에멀전 폭약의 내충격성이 좋아질 것으로 예상하였었다. 하지만 수중 내충격성 시험 결과 큰 차이가 없었다. 다만 수중 내충격에 크게 영향을 받지 않는 젤라틴 다이ना마이트 20g를 부스타로 사용하여 시험한 결과는 기존 젤라틴 다이나마이트의 내충격 시험 결과와 동일한 결과를 얻었다. 따라서 터널의 심발공과 같이 인접공에 근접하는 경우에는 젤라틴 다이나마이트를 전폭약포로 사용하고 일반 에멀전 폭약을 사용하면 발파 실패를 상당히 예방할 수 있을 것으로 보여진다. 시험결과는 표 4에 나타내었다.

표 4. 뇌관 종류별 내충격 시험 결과

| 뇌관종류 | 침장약량(g) | 수중한계폭발거리(m) at 지연단차 200ms | 비고 |
|------|---------|------------------------------|----------------|
| 4호 | 0.250 | 0.5 | |
| 6호 | 0.400 | 0.5 | |
| 8호 | 0.600 | 0.5 | |
| 10호 | 0.800 | 0.5 | |
| 8호 | 0.600 | 0.4(0.3이하 순폭됨) | Booster 20g 사용 |

3.3 뇌관 점화 전류치 변화에 따른 초시편차 평가

국내 KS 규정 시험법 KS M4803(전기뇌관)의 점화전류 시험법에 의하면 일반적으로 전기 뇌관은 0.25A의 직류전류에서는 발화하지 않고 1.0A이상에서의 일정한 직류전류에서는 기폭되어야 한다고 되어 있다. 당사에서 생산하는 전기뇌관의 경우 최소점화 전류는 0.4~0.5A이며 완전한 기폭을 위해서는 1.0A이상의 직류전류가 필요하다. 하지만 최소발화전류는 사

용하는 뇌관 발수에 따라 1발의 경우 1A, 50발은 3.0A, 100발은 4.5A, 200발은 6.5A 등의 최소 발화 전류 기준이 있다(한화 화약류 제품 설명서 참조). 또한 편차는 점화전류 3A에서 ±5%이내의 초시오차를 가지고 있다. 점화전류별 초시편차시험 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5의 시험결과를 보면 순발뇌관의 경우 점화전류가 0.6A인 경우 45ms의 범위를 가지며 1A에서는 1ms, 3A에서는 초시편차가 없는 것으로 나타났다. 기타 지연뇌관의 경우도 3A에서는 10ms미만의 편차를 나타내고 있으며 3A미만의 점화전류에서는 큰 편차를 보이고 있다. 따라서 동일초시의 뇌관인 경우에도 초시편차를 나타내고 있으므로 동일 초시를 가진 공의 발파에서도 선행 발파에 의한 내충격성을 받아 발파실패의 가능성이 대두된다. 결과적으로 전기뇌관 발파의 경우 점화전류의 기준치 준수도 매우 중요하다.

표 5. 뇌관 점화 전류별 초시 편차 시험 결과

| 뇌관종류 | 전류값(A) | 초시편차(최대값-최소값),ms |
|-------|--------|------------------|
| 순발 | 0.6 | 45 |
| | 1.0 | 1 |
| | 3.0 | 0 |
| MS 5단 | 0.6 | 40 |
| | 1.0 | 6 |
| | 3.0 | 5 |
| LP 1단 | 0.6 | 51 |
| | 1.0 | 37 |
| | 3.0 | 8 |
| LP 3단 | 0.6 | 37 |
| | 1.0 | 25 |
| | 3.0 | 7 |
| LP 5단 | 0.6 | 84 |
| | 1.0 | 43 |
| | 3.0 | 10 |
| LP 7단 | 0.6 | 38 |
| | 1.0 | 28 |
| | 3.0 | 5 |

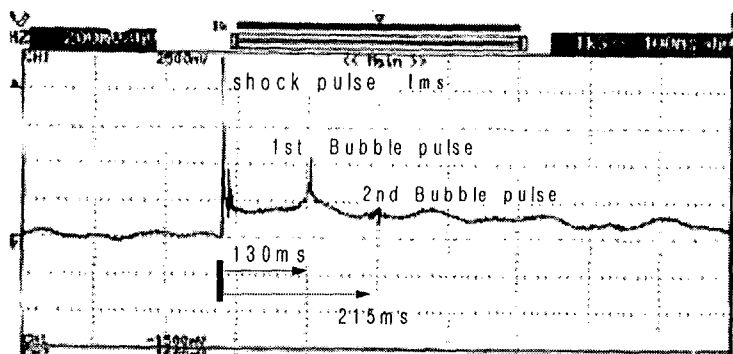


그림 3. 수중 폭발 압력 기록지

3.4 소규모 초시편차에서의 내충격시험

지난 에멀전 폭약 내충격 특성 연구에서는 주로 10ms이상에서 1000ms범위 내 다른 지연 초시를 가진 공들의 선행 폭발에 의한 내충격성 영향을 주로 연구하였다. 수중에서 그림 3 과 같이 수중 폭발 압력 기록치를 확인해보면 폭발 충격파는 1ms전후에 인접공에 도달하여 영향을 준다. 그 이후 에멀전 폭약 내에 있는 버블(Bubble)은 복원되고 1차 가스 압력파 (Bubble pulse)가 도달하는 약 130ms 전후까지 그림 4와 같이 수중 한계폭발거리는 안정화 되었다가 그 이후 급격히 커진다. 본 시험에서는 10ms이하에서의 수중내충격성을 평가하여 에멀전 폭약 내의 충격파에 의한 버블의 파괴, 회복에 대해 상세히 검토하였다. 10ms이하에서의 수중 내충격성 시험결과는 그림 5에 나타내었다.

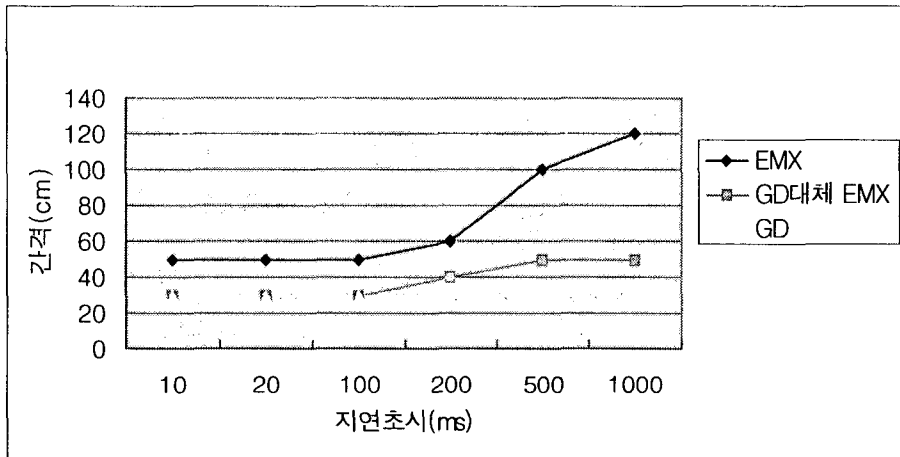


그림 4. 수중 한계 폭발 거리(10~1000ms범위)

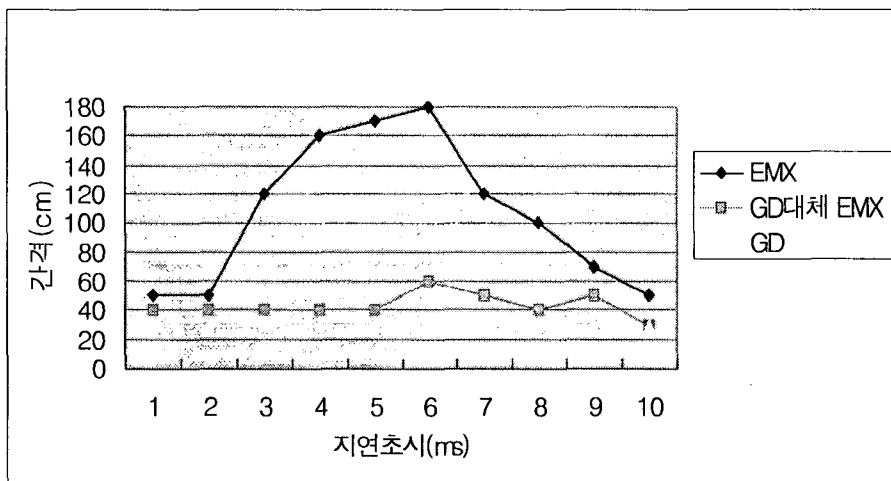


그림 5. 수중 한계 폭발 거리(10ms 이하)

이 시험 결과를 검토해보면 젤라틴 다이내마이트의 경우 10~1000(ms)범위에서의 시험결과와 마찬가지로 수중 한계폭발거리의 변화는 나타나지 않았다. 하지만 에멀전 폭약의 경우 6ms에서 내충격성이 기존의 10~1000(ms)구간에 나타난 수중 한계폭발거리보다 훨씬 길어졌다. 이것은 수중 충격파의 경우 1~2(ms)이내에 폭약에 도달, 통과하지만 버블의 파괴는 서서히 진행되어 6ms부근에서 완전히 파괴되고 그 이후에는 버블이 복원되는 것으로 보여진다. 이 결과를 보고 발파와 연관해보면 인접공의 영향은 동일 초시단차를 가진 공에서의 영향이 더욱 더 심각하다는 것을 나타내고 있다. 예를 들어 한화에서 양산하고 있는 제품의 초시편차를 볼 때 동일 초시에서 초시편차가 약 10ms이내에서 발생하므로 초시가 다른 공에서의 영향보다는 동일 초시를 가진 공에서의 선행 충격 압력파에 의한 버블의 파괴로 인한 사압 현상으로 발파가 실패할 확률이 높을 것으로 보인다. 또한 동일 순발공에서도 공간격이 좁을 경우 선행공에서의 충격압력에 의한 발파실패도 가능한 것으로 보이며 특히 점화전류가 기준치보다 적을 경우에는 내충격성은 더욱 더 나빠질 가능성이 많을 것으로 보여진다.

그림 6에는 수중 한계폭발거리를 암중 한계폭발거리로 변경하여 나타내었다. 이 그림으로 보면 보통 에멀전 폭약의 경우 동일 초시의 뇌관을 가진 발파공에서의 공간격이 1.35m이하인 경우 사압에 의한 발파효율 저하가 발생할 가능성이 있다고 보여진다. 이 시험 결과를 기준으로 한화에서도 내충격성 기준을 기존의 200ms에서 10ms미만으로 변경할 예정이다.

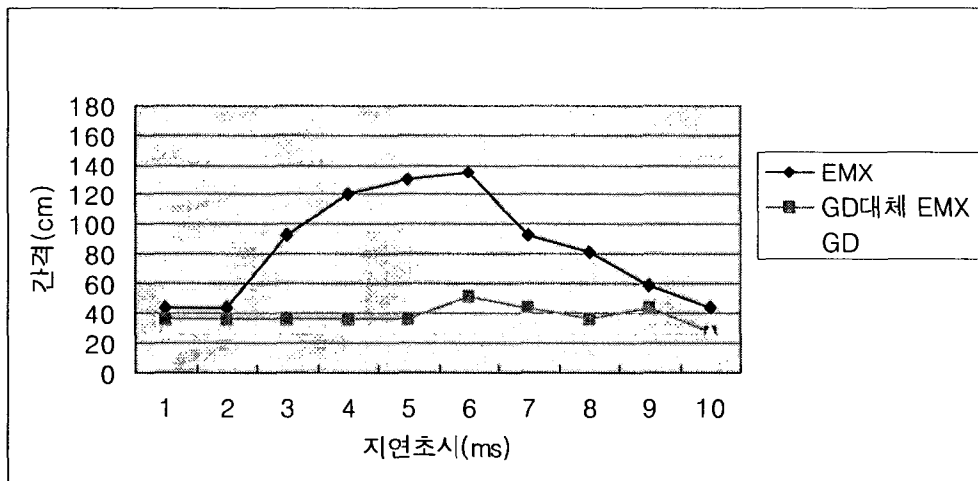


그림 6. 암중 한계 폭발 거리

4. 결론

지연 시차를 이용한 발파에서 먼저 기폭된 발파공의 충격압력은 인접공의 폭약을 압축하여 위력을 저하시키고 최악의 경우에는 사압을 일으켜 잔류약을 발생시킬 수 있으며 이는

발파 효율을 저하시키는 원인이 되는 것으로 알려져 있는데 본 시험에서 다양한 시험 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 뇌관의 경우 선행공에 의한 폭발 압력(충격파)에 의한 영향에서 뇌관의 기폭력 부족에 의한 발파실패는 없을 것으로 보여진다. 다만 수중 1m 이내 혹은 암중 0.8m 이내의 경우 뇌관의 외형 손상이 크므로 뇌관의 관체 파손에 의한 수분 유입이나 점화에너지 및 지연제 연소 미흡으로 인한 기폭 실패도 예상된다. 또한 내충격 압력을 받은 뇌관의 경우 초시는 빨라지고 초시범위도 넓어지는 것을 확인하였다.
2. 뇌관의 위력에 따른 수중 내충격성 차이는 없으며 에멀전 폭약 자체의 특성에 따라 내충격성이 결정된다. 다만 부스타로 내충격성이 양호한 폭약을 사용할 경우 내충격성은 부스타의 내충격성에 따라 에멀전 폭약의 내충격성이 향상된다. 따라서 터널발파의 심발공에 전폭약포로 젤라틴 다이내마이트를 사용하고 에멀전 폭약을 장약하여 발파할 경우 내충격성은 상당히 개선될 것으로 판단된다.
3. 전기뇌관의 경우 점화전류에 따라 초시 편차가 발생하므로 점화 전류를 제조사에서 요구한 기준치이상으로 관리하여 사용하여야 한다. 따라서 주기적인 발파기 점검도 필요할 것으로 보인다.
4. 에멀전 폭약의 수중 내충격성은 충격파가 도달하여 버블이 파괴 복원되는 시점에서 제일 좋지 않으며 통상의 에멀전 폭약은 6ms부근이다. 그러나 젤라틴 다이내마이트의 경우 내충격성의 변화는 나타나지 않았다. 따라서 근접공의 선행충격파 영향은 동일 단차를 가진 공에서의 영향이 더 심각할 수도 있다는 것을 알 수 있었다.

결론적으로 공간격이 135cm 이하로 유지되는 터널발파에서 에멀전 폭약을 사용할 경우 심한 위력저하 및 불폭이 발생하여 발파효율이 저하될 수도 있으므로 반드시 심발용 특수 폭약인 GD 대체 EMX 또는 젤라틴 다이내마이트를 부스타로 사용하는 것이 적당할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이영호, 이승찬, 이용소, 윤종화, 2001, 에멀전 폭약의 내충격 특성, 대한화약발파공학회 Vol. 19, No. 3.
2. 이영호, 이승찬, 이용소, 김문태, 2007, 에멀전 폭약의 내충격 특성 연구, 제 4회 한화발파 심포지움.

이영호, 이승찬, 이용소, 김문태

3. Christopher, G. Smith, 2006, Detonator Malfunctions—Emulsion Sensitizer Effects, Proceedings of the 37th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, ISEE, DALLAS, TEXAS, U.S.A.
4. Matsuzawa T, et al,1982, Detonability of Emulsion Explosives under Various Pressures. Journal of the Industrial Explosives Society, Japan. Vol. 43, No. 5.