

지진동 Source 제공을 위한 시추공 발파 기술 사례

A Case Study on the Borehole Blasting for Offering the Ground Vibration Source

조 영곤, 김 희도, 조 준호, 함 준호

Young-Kon Cho, Hee-Do Kim, Jun-Ho Cho, Jun-Ho Ham

(주)고려노벨화약

초 록

본 기술사례는 과학기술부가 주도하는 자연재해방재기술개발 국가중점연구사업 중 기상청 주관의 기상지진기술개발사업의 한반도 지각속도 구조연구 과제 중 서산지역과 포항지역을 연결하는 200km 축선에서 2차원 지각구조를 밝히기 위한 지각규모 굴절파탐사의 지진동 source 제공을 위해 발파로 실시하였다.

본 연구를 위하여 국내에서는 거의 실행해 본 경우가 없는 지발당 장약량이 500~1000kg의 발파를 실시하였다. 200개의 계측지점에 지진동이 전달될 수 있도록 충분한 폭속을 가진 폭약과 외부의 충격과 우수한 기폭력, 시차가 정확한 비전기뇌관을 특수 제작하여 사용하였다. 시추공내로 유출되는 물에 의한 사압을 방지하기 위하여 폭약은 철관용기를 제작하여 벌크 형태로 장약을 하여 발파를 하였다. 발파전 용기 밀폐 시험 및 용기제작 후 기폭실험, 수압작용으로 인한 폭약 및 뇌관에 미치는 영향 등을 실험을 통하여 사전 파악을 하였다. 또한 실제 발파 중 진동치를 측정된 결과 보안물건에 대한 진동치값은 미광무국식(USBM)을 이용하여 예측한 진동치보다 평균 180% 정도 높게 나타났다.

핵심어: 한반도 지각속도 구조연구, 지발당 장약량, 시추공 발파, 사압, 철관용기

1. 서 론

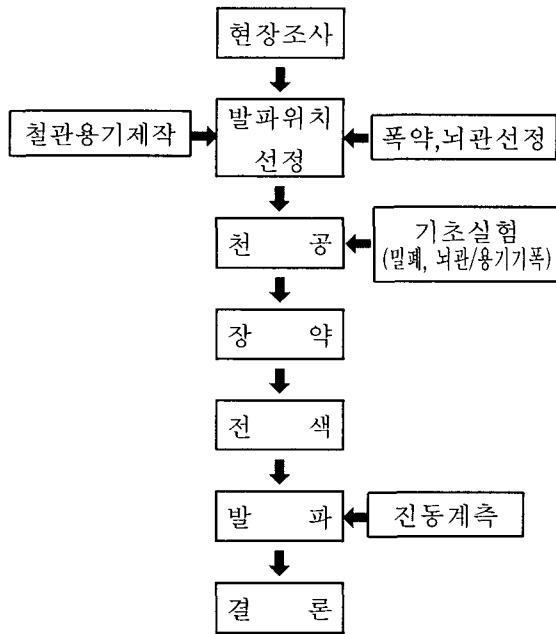
본 연구는 과학기술부가 주도하는 자연재해 방재기술개발 국가중점연구사업 중 기상청 주관의 기상지진기술개발사업의 한반도 지각 속도구조 연구 과제 중 서산지역과 포항지역을 연결하는 200Km 축선에서 2차원 지각구조를 밝히기 위한 지각규모 굴절파탐사를 위한 지진동(Ground vibration) source 제공을 위한 발파기술 사례이다. 이 연구를 위해 축선 양단에 지진동이 200km까지 전달될 수 있도록

공경이 $\phi 12''$ (300mm)인 시추공을 지하 100m로 천공하여 폭약을 500~1,000kg을 장약하고 발파하여 축선상에 1km 간격으로 설치된 200개의 지진관측기 지진동이 기록될 수 있도록 하기 위한 방법을 모색하였다.

본 논문에서는 이와 같이 단일공으로 100m 깊이 이상의 심부에 1000kg의 폭약을 사용하여 발파를 실시한 사례가 국내에는 거의 없었던 한반도 지각 속도구조 연구과제 중에 실시된 발파기술 사례를 기술하고자 한다.

2. 작업 개요

본 연구에서 발파를 실시하기 위한 작업 준비 과정을 살펴보면 다음과 같다.



내에는 서산 A 지구 간척지인 농지이며, 아래의 그림 1과 표 1은 발파위치 및 부근에 분포하는 보안물건의 현황 및 이격거리를 나타낸 것이다.

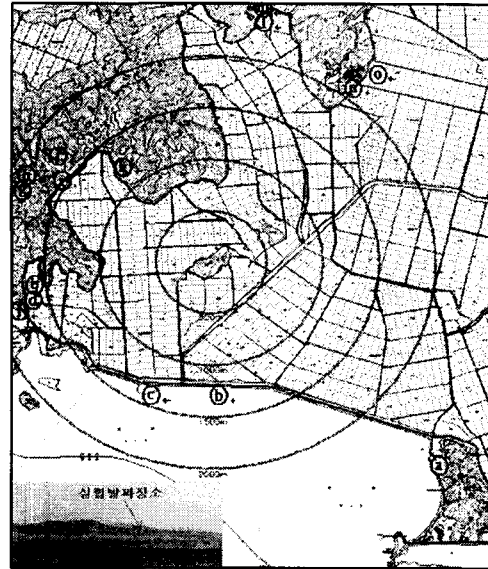


그림 1. 서산지역 발파위치

3. 현장 주변 환경

3.1 발파지역별 주변 환경

“한반도 지각 속도구조 연구”에 지진동 source를 제공하기 위한 심부 시추공 발파 대상지역은 충청남도 서산시 부석면 창리와 충청북도 영동군 용산면 울리, 경주시 양북면 세 곳이 선정되었으나, 포항의 경우 현지 발파 입지 선정 곤란으로 본 연구에서는 제외하고 서산과 영동 두 곳에서만 발파를 실시하였다. 따라서 발파 지점에 대한 대략적인 위치 및 주변 환경을 알아보면 다음과 같다.

(1) 서산지역

대구경발파 위치는 충남 서산시 부석면 창리에 소재한 대섬으로, 발파지점에서 750m

표 1. 서산지역 보안물건 현황(서산시 부석면)

보안물건	위치	이격거리
㉠ 구세군간월동영문	간월도리	2,900m
㉡ A지구 방조제 길	부석면	1,150m
㉢ LPG충전소	창리	1,350m
㉣ 창리휴게소	창리	1,800m
㉤ 325번지	창리	1,700m
㉥ 창리진료보건소	창리	2,000m
㉦ 창리성결교회	창리	2,000m
㉧ 부남경로당	창리	1,950m
㉨ 원적골 민가	창리	1,600m
㉩ 강당분교	창리	1,800m
㉪ 550 번지	창리	1,700m
㉫ 돈사(700두)	강당리	2,360m
㉬ 양계장(5만마리)	강당리	2,420m
㉭ 개 사육장(30두)	강당리	2,000m
㉮ 신양산업	강당리	2,150m

(2) 영동지역

영동지역의 발파위치는 충북 영동군 용산면 울리에 위치하고 있으며, 발파지점에서 700m ~ 2,000m 내에 시궁골, 마을, 공장, 교회 등의 보안물건이 분포하고 있으며 이들 보안물건의 현황 및 이격거리는 아래의 그림 2와 표 2에 나타낸 바와 같다.

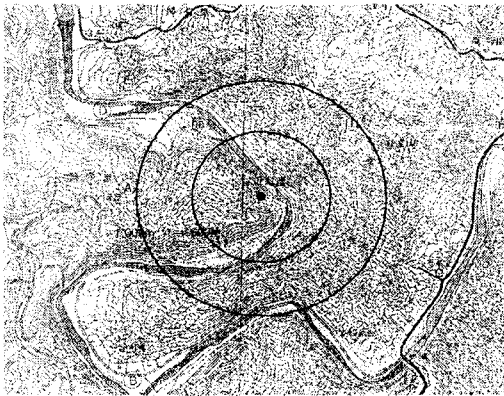


그림 2. 영동지역 주변 현황

표 2. 영동지역 보안물건 현황(영동군 용산면)

보안물건	위 치	이격거리
㉠ 시궁골	시금리	1,250m
㉡ 시금리 마을	시금리	700m
㉢ 전주동	울 리	1,300m
㉣ 푸른농원	한석리	1,800m
㉤ 한석교회	한석리	1,800m
㉥ 어내골	한석리	2,000m
㉦ 영동공장	울 리	1,400m

4. 준비 작업

4.1 대구경 천공

(1) 천 공

대구경 천공은 T-4로 천공을 하였으며, 대구경 천공 깊이는 지표에서 100m이며 천공과정에서 Casing 설치, 지하수 유출의 저감대책(지하수가 많이 나오면 천공에 저항을 받음)을 세웠으며, 칼라 등을 설치하였다.

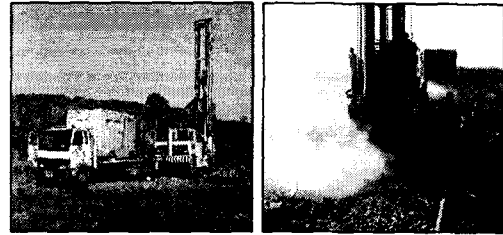


그림 3. 대구경 천공 과정

(2) 작업개요

심부 시추공 발파를 위한 각 발파 위치별 천공작업은 다음의 표 3과 같다.

표 3. 지역별 천공

구 분	서산지역	영동지역
천 공 위 치	서산시 부석면	영동군 용산면
대구경 공경	300mm	300mm
대구경 깊이	100m	100m

4.2 폭약류 및 뇌관선정

본 연구에 있어서 중요한 것은 100km 이상 떨어진 계측지점에서 인위적으로 발생시킨 발파에 의한 지진동 source 제공을 목적으로 하고 있기 때문에 목적 지점까지 최대한 지진동이 계측되게 하기 위하여 가능한 한 폭속이 높은 폭약과 100m 깊이의 수압이 작용하는 특수한 상황과 14~26개를 동시에 제발발파를 하기 때문에 정밀시차를 제공하는 뇌관을 사용할 필요가 있다. 뿐만 아니라 발파 여건상 지하 100m의 심부에서는 지하수가 공내로 유출되어 공내에 투입된 폭약에 10기압 정도의 압력이 가해질 것으로 예상되므로 적절한 투입방법을 모색해야 했으며 폭약의 선택에 있어서도 사암의 위험성이 적은 폭약을 선택할 필요가 있었다. 따라서 이러한 여러 가지 상황들을 종합하여 볼 때 폭약을 투입하는 방법은 철관을 제작하여 그 안에 폭약을 담아 투하 하였다. 폭약의 경우 현재

국내 생산 산업용 폭약 중 가장 폭속이 높고 사압의 위험이 낮은 NG 계열의 MegaMITE-II(폭속 6,700m/sec)를 사용하였으며, 뇌관은 외부의 충격 및 전기적 위험에 안전하여야 하며, 기폭력이 우수하여 완전한 기폭과 정확한 시차가 보장되어야 한다. 이러한 점에서 비전기뇌관은 외부의 충격에 견디도록 3중구조의 tube를 채택하여 고강도의 인장력을 가지며, 내충격성, 내마모성, 내안전성이 탁월하며 유연하고 또한 어떠한 전기적 위험에도 안전하며, 정확한 시차를 가지고 있다. 따라서 시추공 발파시 사용될 뇌관으로는 Nonel 비전기뇌관을 채택하여 사용하였다. 다만 본 연구에서 사용된 뇌관은 철관용기 하나당 2개의 뇌관을 사용하게 되어 있어 이중으로 제작된 특수 뇌관을 사용하였다. 다음의 표 4 및 그림 4는 본 연구에서 사용된 폭약류와 뇌관의 종류 및 특수 제작된 뇌관을 나타낸 것이다.

표 4. 사용 폭약 및 뇌관의 제원

구 분		종류	사용량(kg, 개)	비고
폭약류	폭약	Megamite- II	500kg(영동)	Bulk
			1,000kg(서산)	
	전폭약	40kg(50mm)	Paper	
뇌관	비전기(Nonel)	MS	80	순발
		Bunch connector	8	순발
		Unidet	2	순발
	전기(Konel)	MS	2	순발

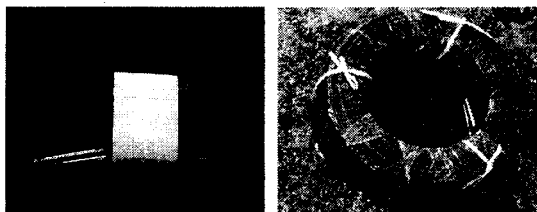


그림 4. 특수 제작된 이중 비전기뇌관

5. 발파 용기

본 연구를 위한 천공경은 300mm로 지하 100m까지 천공하였다. 지하심부로 내려갈수록 10m당 대략 1kg/cm²의 수압이 작용하므로 수압이 최대 10 kg/cm²의 압력이 작용한다. 따라서 수압 및 내정압으로부터 폭약의 사압을 방지하기 위하여 시추공 발파에서는 폭약을 보호하는 철관용기를 제작하여 발파를 시행하였다.

5.1 철관 용기 구조

공경 300mm, 장약량 1,000kg를 장약하기 위해서는 장약장의 길이가 약 14~26m 정도 된다. 장약을 쉬운 방법으로 하기 위해 용기의 크기를 2m크기로 제작하였다. 용기 제작에 있어서 가장 중요한 부분은 용기내부를 진공상태로 만들어 주는 것이다. 용기의 밀폐가 이루어지지 않으면 폭약에 수압이 작용하여 불폭의 위험이 있기 때문이다. 본 연구에서 제작 사용된 철관용기의 구조는 다음의 그림 5와 같으며, 완전히 밀폐가 이루어지도록 설계하였다.

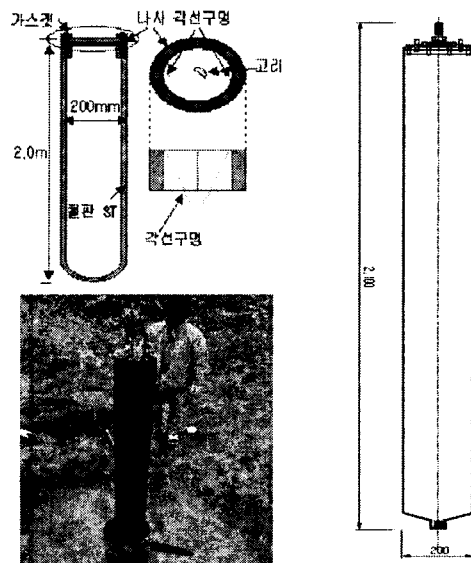


그림 5. 제작용기 구조

5.2 용기당 폭약량 및 소요 용기량

대구경 발파를 위해 천공한 천공경 지름은 300mm이며 제작된 용기의 지름은 190.7mm이므로 제작된 철관용기 1개의 폭약량은 폭약의 비중을 1.5로 가정할 때 다음과 같이 계산하여 산출할 수 있다.

$$\{(0.1907m - 0.0106m) / 2\}^2 \times \pi \times 2m \times 1.5g/cm^3 = 76.4kg$$

다음 표는 대구경 발파시 발파지역에서 필요한 용기 개수 및 사용된 폭약량을 표시한 것이다.

표 5. 지역별 용기소요량

장 소	폭약사용량	용기 수	비 고
서산지역	1,000	13	실행
영동지역	500	7	실행
포항지역		취소	
계	1,500	20	

5.3 용기내 장약 및 밀폐

용기의 제작 후 장약은 수압을 받지 않도록 밀장전을 실시하여야 하며, 장전시 진폭약포는 용기내 1ea 장약을 하여야 하지만, 본 대구경 발파는 안전한 발파를 위하여 용기당 뇌관4개를 사용 하였다.

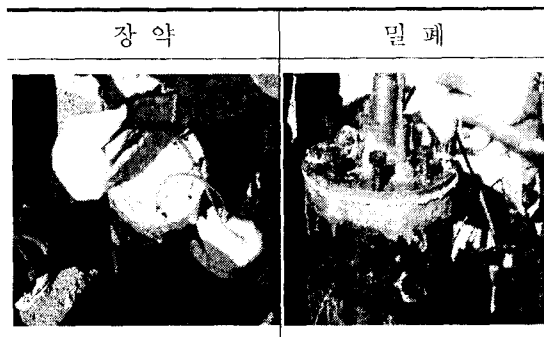


그림 6. 천공내장약 및 밀폐

5.4 공내투입 및 전색

용기 내에 장약 후, 천공내 장약은 원치가 있는 카고 크레인을 사용하여 안전에 만전을 기한다. 용기와 폭약의 무게가 약 200Kg정도의 무게를 가지므로 폭약 용기를 투입시 안전하게 이루어지도록 하였다. 전색은 13mm 골재를 사용하였다.

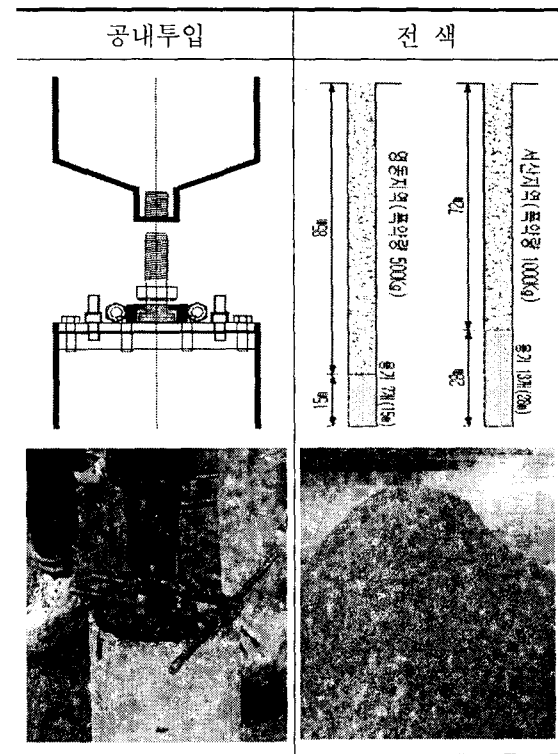


그림 7. 공내투입 및 전색

6. 대구경 발파 기초실험

시추공 발파를 실시하기에 앞서, 천공심도 100m와 같은 환경조건을 가진 수심100m 지점에서 다음과 같은 실험을 실시하여 시추공 발파시 제작된 용기 내에서 폭약과 뇌관에 미칠 수 있는 영향을 사전에 파악하도록 하였다.

- 1) 용기 밀폐를 위한 물질선정

2) 용기제작 후 기폭실험

3) 수압작용으로 인한 폭약 및 뇌관에 미치는 영향 파악

용기 밀폐 실험의 경우 제작된 용기를 지하 100m 지점에 내려 완전밀폐 여부를 판단하는데 목적이 있다. 대구경 발파시 완전밀폐는 성공여부를 좌우한다고 할 수 있다. 밀폐 재료로는 실리콘, 접착제, 가스켓, 본드, 에폭스 등을 사용하여 실시하였으며 그 결과 밀폐도가 우수한 것으로 나타났다.

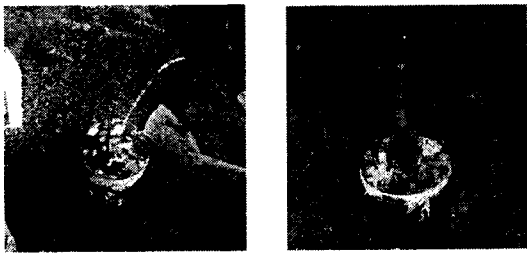


그림 8. 용기 밀폐 실험

용기제작 후 폭약에 의한 철관의 기폭여부를 판단하기 위해 실험을 하였다. 용기에 모래와 폭약 1개를 넣고 다시 모래로 전색을 한 후 기폭한 결과 철관이 완전히 기폭되어 사압이 발생하지 않는 경우 철관용기는 완전히 기폭되어 지진동 발생에 장애가 없을 것으로 판단하였다.

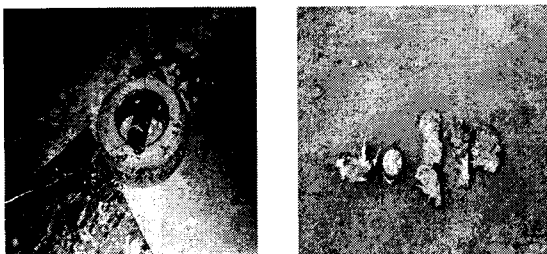


그림 9. 용기 기폭 실험

지하 100m 지점에서의 뇌관의 사압 여부를 알아보기 위해 천공된 시추공속에 약 10분간

침수시킨 후 기폭실험을 2회 실시하였지만 모두 기폭이 되는 것으로 나타났다.

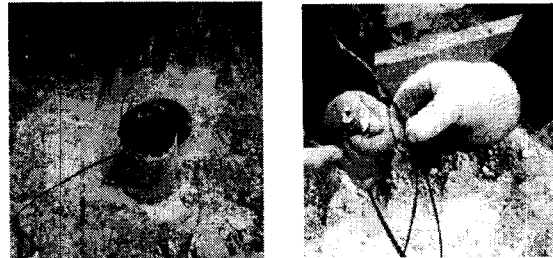


그림 10. 뇌관 기폭 실험

따라서 이러한 사전 실험으로부터 100m에서의 기폭은 문제가 되지 않을 것으로 판단하였다.

7. 진동측정

본 연구의 목적인 지각속도 구조연구와 같은 대구경 실험발파에서는 일반발파와 달리 진동측정기를 사용하여 진동을 측정하는 것이 아니다. 한반도 지각속도 구조연구에 사용되는 측정기는 캐나다에서 수입한 지진관측기를 사용하여 측정을 하였다. 다음의 그림은 본 연구에서 진동 측정에 사용된 지진 관측기를 보여주고 있다.

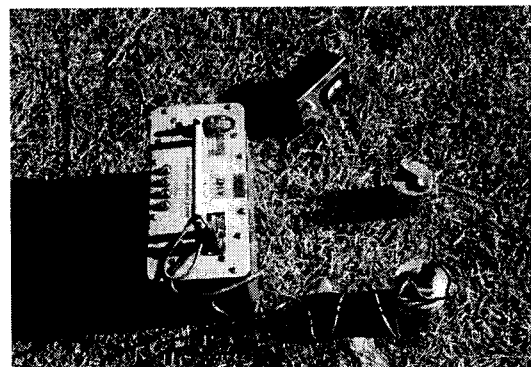


그림 11. 지진관측기

이 밖에도 별도로 당 발파시 일반현장에서 사용중인 진동측정기를 사용하여 보안물건에 대한 진동을 측정하였다. 진동측정은 서산지역에 계측기 4대 와 영동지역에 계측기 3대를 설치하여 측정하였다.

8. 발 파

발파는 서산지역 발파 후 15분 후에 영동지역에서 순차적으로 발파를 실시하였다.

이와 같이 발파시간이 15분 간격으로 실시한 이유는 캐나다산 지진 관측기가 위성파 송수신하는 시간 때문이다.

다음의 그림 12는 서산지역의 발파 지점에서 장약과 전색을 마친 후 발파 전, 발파시, 발파 후의 과정들을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 발파가 순조롭게 이루어져 외부로의 에너지 방출 없이 거의 모든 에너지가 지진동으로 변환이 되었음을 알 수 있다.

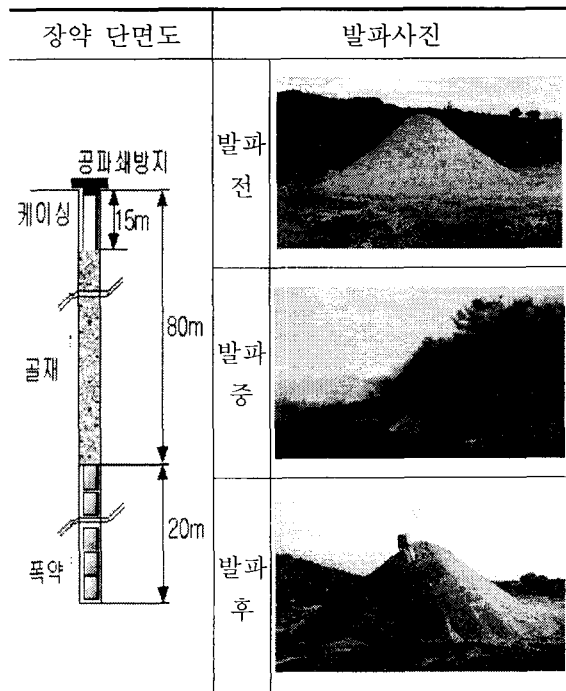


그림 12. 서산지역 발파과정

9. 계측결과

본 과업의 발파진동의 크기를 측정하여 주변의 보안물건의 영향 유무를 판단하고자 서산지역 4대, 영동지역 3대로 측정하였다. 다음의 표6은 발파 위치별 사용 계측기기의 현황을 나타낸 것이며, 표 7은 발파지역별 진동 계측 결과를 나타낸 것이다.

표 6. 발파 위치별 사용 계측기기 현황

구 분	사용계측기기		
	DS-477	VMS 200s	총 계
충남 서산	1 대	3 대	4 대
충북 영동	3 대	-	3 대

9.1 진동계측 결과분석

$$V = 114 \times \left[\frac{D}{W^{1/2}} \right]^{-1.6} \quad (1)$$

식 (1)과 같은 미광무국(USBM)식을 지역별로 적용한 예상진동치와 실제 진동계측치의 비교를 해본 결과 서산지역은 208% 증가하였고 영동지역은 142% 증가하였다. 두 지역을 같이 비교하면 180% 증가하는 결과가 되었다. 이와 같은 결과는 미광무식이 일반적인 벤치발파의 진동 예상치이고 본 사례는 1자유면 발파라는 점과 추정식에 사용된 K값(K = 110~160)이 낮게 책정이 된 점, 현장의 암지질 상태의 차이, 대부분의 발파 에너지의 압력 에너지로의 변화 등이 이와 같은 결과를 보이게 된 주요 이유인 것으로 분석되었다.

따라서 이상의 결과로부터 발파로 인해 발생된 대부분의 에너지가 본 연구의 목적대로 지진동 발생을 위해 사용되어졌음을 알 수 있다.

표 7. 서산지역 및 영동지역 진동계측결과

영동지역		이격거리	접선성분	수직성분	진행성분	PVS	S·D
측 점 # 1	DS-477	424 m	2.03 mm/s	8.13 mm/s	5.08 mm/s	8.91 mm/s	19.35
	PVS Waveform						
측 점 # 2	DS-477	600 m	4.32 mm/s	11.3 mm/s	3.81 mm/s	11.6 mm/s	27.39
	PVS Waveform						
측 점 # 3	DS-477	1,400 m	2.79 mm/s	3.30 mm/s	2.54 mm/s	4.73 mm/s	63.90
	PVS Waveform						
서산지역		이격거리	접선성분	수직성분	진행성분	PVS	S·D
측 점 # 1	VMS 200s	301.67 m	N/A mm/s	48.01 mm/s	35.56 mm/s	49.78 mm/s	10
	Vertical Waveform (in/s)						
측 점 # 2	VMS 200s	904.99 m	6.86 mm/s	5.84 mm/s	2.29mm/s	7.11 mm/s	30
	Vertical Waveform (in/s)						
측 점 # 3	VMS 200s	1,508.3 m	1.78 mm/s	5.84 mm/s	4.06 mm/s	6.86 mm/s	50
	Vertical Waveform (in/s)						

10. 결론

과학기술부가 주도하는 자연재해방재기술개발 국가중점연구사업의 일환인 기상청 주관의 기상지진기술개발사업의 “한반도 지각 속도구조 연구”는 지진 방재 기술개발연구에 필요한 가장 기본적이고 중요한 지각 속도구조를 밝히는 연구로써 그 진동 source를 얻기 위해 본 연구의 발파를 실시하였으며, 발파 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 우리나라에서 실시되는 발파는 대부분 노천발파와 터널발파가 주를 이룬다. 여기에 사용되는 비트(Bit)는 최대 89mm(석회석광산 제외), 최소 38mm를 사용하여 발파를 실시한다. 그러나 본 실험발파는 300mm의 대구경으로 천공을 하였으며, 깊이는 100m를 천공하여 발파를 실시하였다.

2) 300mm 천공경에 단일장약으로 1,000kg, 500kg를 장약한 후 발파를 실시한 사례가 외국의 경우 “지각속도구조 연구실험”을 위해서 단일공으로 최대 6,000kg까지 장약하여 발파를 실시한 경우(실험장소 : 캐나다)가 있었지만, 국내에는 거의 없었던 사례로 심부 대구경 발파의 경험을 축적할 수 있었던 기회였다.

3) 본 발파의 경우 심부 시추공 발파이기 때문에 지하수의 유출과 이로 인해 폭약이 사압현상으로 불폭될 것을 예방하기 위하여 철관용기를 제작하여 사압현상을 방지토록 하였으며, 완전한 기폭으로 유도하기 위하여 특수 제작된 이중의 특수 순발 비전기 뇌관을 사용하여 발파를 실시하였다.

4) 서산지역을 시점으로 15분 후 영동지역 발파를 실시하였다. 서산지역은 매우 양호하게

발파가 이루어졌다. 그러나 영동지역은 약30m정도의 비산이 발생하였다.

5) 서산지역과 영동지역의 진동을 측정된 결과 당초 예상치로 사용하였던 미광무국식에 의한 진동예상치보다 매우 높게 나타났으며, 실제 계측치는 예상치에 비해 평균 180% 가량 높게 나타났다.

- 서산지역

보안물건	이격거리	결과치 (cm/s)
없 음	500m이내	4.980
	1,000이내	0.711
LPG충진소	1,350m	0.686
원적골 마을	1,600m	
창리휴게소	1,800m	0.267
돈사(700두)	2,360m	
간월도	2,500m	

- 영동지역

보안물건	이격거리	결과치 (cm/s)
없 음	400m	0.891
	600m	1.160
시공골	1,250m	0.470
시금리 마을	1,300m	
전주동	1,500m	

이상과 같이 단일 공으로 실시한 본 실험발파는 성공적인 발파작업이 되도록 여러 가지 실험을 하면서 시행착오도 있었지만 이를 발판으로 발파기술을 향상시키면서 서산, 영동지역의 발파를 안전하고 주변 주민이나 보안물건에 피해를 입히지 않고 성공적으로 발파를 하였다.