

인접구조물(저수지내 여수로)의 영향을 고려한 최적발파 공법 선정

글 | 김 태 한 과장 청원~삼주 2공구 현장 043-285-3924 | E-mail : ssycwsj@ssyenc.com

발파진동에 의한 영향을 고려한 종합적 분석을 통해 노현저수지 내 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 정밀진동 제어 발파를 시행함으로써 공기내에 효과적인 굴착을 진행한 사례이다. 체체측 호안옹벽에 기 발생되어있는 균열과 신축이음부 하부에 공동이 발생되어있는 노현저수지 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 범위(진동허용기준치 0.2kine)내에서 정밀 진동제어발파를 수행함으로써 효율적인 공사관리를 할 수 있었다.

1. 서론

현재 국내 터파기 현장에서는 소음진동 규제법의 강화, 각종 건설민원 발생 및 안전강화 관리차원에서 종래 시행되어지던 발파 공법이외에 외부요인에 보다 효과적으로 대처할 수 있는 최적의 발파공법 선정을 위해 노력하고 있다. 이중 최근에 제안된 건설교통부 설계지침에서는 진동 규제치의 차이를 두어 파쇄와 발파를 확연히 구분하는 실정이나 기존의 발파와 달리 파쇄의 경우는 그 시공사례가 많지 않아 현장적용시 경제성 및 시공성이 떨어지고 이에따른 시행착오가 우려된다.

“00고속도로 건설공사”의 경우, 토공사시 인접한 노현저수지내 여수로(여수토, 방수로)구조물로 인해 당초 굴착공법으로 제안된 “미진동 파쇄기”의 대안으로 발파진동에 의한 영향을 고려한 종합적 분석을 통해 노현저수지내 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 정밀진동 제어발파를 시행함으로써 공기내에 효과적인 굴착을 진행한 사례이다.

2. 대상현장 위치 및 현황

〈그림 1〉 위치도



〈그림 2〉 전경사진

물넘이 언체 및 측수로 전경



사면 전경



방수로 전경



인접 고속도로공사현장 전경



3. 관련자료 검토 및 현장조사

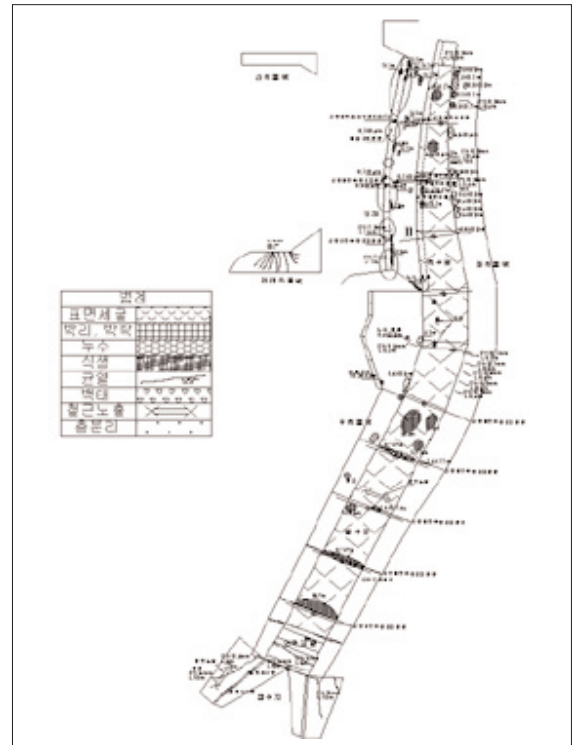
3-1. 지반조사 자료

여수토방수로의 측수로 바닥기초는 보통암층, 방수로 바닥기초는 풍화암층과 연암층, 감세공(정수지) 바닥기초는 경암층에 위치하고 있다. 발파시 진동의 영향은 매질이 밀실할수록 크므로 인접고속도로공사 시행을 위한 발파시 여수로 구조물에 대한 영향성 검토가 요구된다. 그리고, 노현저수지 측수로 좌측옹벽 배면부의 인위적인 절취면에 대해 기실시한 지반조사 자료를 검토한 결과 기반암은 규암 및 사질암이며 완전파쇄대 구간이 부분적으로 노출된다. 노현저수지 측수로 좌측옹벽 배면부의 절취면 암반의 풍화정도는 그 변화가 매우 심하며, 고경사 절리군이 주로 분포함.

3-2. 제원조사

여수로구조물의 형태 및 상호 위치는 대체로 설계도면과 일치하는 것으로 조사되었으나, GPR조사에 한 부재두께 조사결과 언체 슈트부두께는 40~58cm로 일부 구간에서 설계(50cm)보다 작은 것으로 탐사되었다. 또한 측수로 및 방수로 바닥콘크리트 두께는 45~80cm로 대체로 설계(80cm)보다 작다.

3-3. 외관조사



(1) 여수토

1) 접근수로

접근수로 중 제체측 호안옹벽에 수직균열 및 경사균열(Cw : 5mm, L=3.5m, 10개소)이 방사형으로 발생되어 있으며, 표면처리 보수가 실시되었으나 보수부의 재균열이 발생되어 있음이 확인되었다. 발생한 균열의 형상과 수직도 값(1/36)을 비교 분석한 결과 제체측 옹벽에 발생한 균열은 구조적 균열로 옹벽의 구조적 안전성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

2) 물넘이언체

언체마루 덧씌우기 부위는 전 구간에서 층분리 현상이 발생되어 있으며 일부 구간에서는 누수, 박락, 신축이음부 충전재 탈락, 황균열 등의 손상 및 결함이 발생되어 있음이 확인되었다. 그리고, 언체슈트부의 일부 구간에서 누수, 백태, 박락, 철근노출 등의 손상 및 결함이 발생되어 있음이 확인되었다. 이는 유지관리 관련자료 검토결과 중 노후결함상태의 원인으로 판단한 시공관리미흡으로 판단된다.

3) 측수로

측수로 바닥의 콘크리트에는 박락 등의 손상이 발생되어 있으며, 좌측옹벽에서는 누수, 박락, 백태, 수직균열 등의 손상 및 결함이 일부 구간에 발생되어 있음이 확인되었다. 이는 공용기간 중의 콘크리트 건조수축, 동결융해 등의 내구성저하 원인에 의해 손상이 발생된 것으로 판단된다.

(2) 방수로

1) 바닥

방수로 바닥 전 구간에는 표면세굴과 일부 구간의 박락, 신축이음부 충전재 탈락, 철근노출 등의 손상이 발생하였으며, 신축이음부 손상으로 인해 신축이음부 내부로 물이 유입되는 결함이 확인되었다. 이는 유지관리 관련자료 검토결과 중 노후결함상태의 원인으로 판단한 내구성저하 및 유지관리미흡으로 판단된다.

2) 옹벽

옹벽 전 구간에는 신축이음부 충전재가 탈락되어 있으며, 일부 구간에서 박락, 수직균열, 누수, 백태, 황균열 등의 손상 및 결함이 확인되었다. 이는 유지관리 관련자료 검토결과 중 노후결함상태의 원인으로 판단한 내구성저하 및 유지관리미흡으로 판단된다.

(3) 감세공(정수지)

옹벽에 침하균열이 발생되어 있으며, 우측날개벽에는 침하균

열과 철근노출이 발생되어 있고, 우측날개벽에는 침하균열 및 현처부의 세굴 등의 손상 및 결함이 확인되었다. 이는 시공관리 미흡과 내구성저하 원인에 의해 손상 및 결함이 발생된 것으로 판단된다.

(4) 여수로구조물의 현 상태를 파악하기 위해 외관조사를 실시한 결과 여수토 제체측 호안옹벽에 수직균열 및 경사균열이 방사형으로 발생되어 있었으며, 언체마루와 언체슈트부의 일부 구간에는 누수 및 박락 등의 손상 및 결함이 발생되어 있음이 확인되었다. 현재 여수로구조물에 발생되어 있는 손상 및 결함을 고려할 때, 인접고속도로공사 시행을 위한 발파시 발생하는 진동에 의해 여수로구조물은 추가적인 손상을 입을 수 있을 것으로 판단된다.

3-4. 변위조사

다림추를 이용하여 측수로 및 방수로 옹벽 벽체의 기울음 정도 조사결과 설계도면에서는 옹벽벽체의 기울음 구배는 없으나 여수토의 측수로 좌측옹벽의 최대 각변위는 1/213(구배 1 : 0.0047)로 옹벽 전면측으로 기울어져 있으며, 방수로의 좌·우측 옹벽의 각변위는 1/320~1/42(구배 1 : 0.0238~0.0031)의 범위로 측정되었다. 여수토 측수로 좌측옹벽과 방수로 좌·우측 옹벽에 발생한 변위는 일부 구간에서 라멘구조물의 구조적 손상이 예상되는 한계(1/150)를 초과하고 있는 것으로 나타났으나, 외관조사시 특별한 손상 및 결함이 없음을 고려하면 측정된 각변위는 시공오차에 의한 원인으로 판단된다.

그러나, 제체측 호안옹벽(No.1+19)과 방수로 우측옹벽(No.2+04)의 각변위는 각각 1/36(구배 1 : 0.0278), 1/88(구배 1 : 0.0114)로 이는 일반적인 라멘구조물의 구조적 손상이 예상되는 한계(1/150)를 초과하고 있으며 방사형 균열의 발생 원인과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정된다.

3-5. 콘크리트 압축강도조사

반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도조사 결과 콘크리트 압축강도는 91~257kgf/cm²(평균 201kgf/cm²)로 나타났다.

이 중 측수로 바닥슬래브의 콘크리트 압축강도는 91~97kgf/cm²로 설계압축강도(210kgf/cm²)에 크게 미치지 못한 것으로 확인되었다.

3-6. 철근배근상태조사

철근배근상태조사 결과 철근배근 간격은 수직철근의 경우 200~400mm, 수평철근의 경우 192~285mm로 대체로 각 부재 위치의 설계도면 간격과 일치하는 것으로 확인되었으나, 철근 피복두께 조사결과 철근의 피복두께는 30~80mm로 조사되었으며, 언체슈트부와 방수로 좌·우측옹벽 일부가 기준 피복두께(40~50mm)보다 약 10mm정도 부족한 것으로 확인되었다.


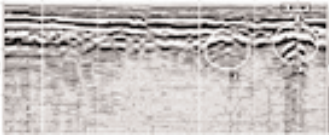

3-7. GPR조사

지반 투과레이다(GPR) 탐사를 통해 노면저수지 여수로구조물의 부재두께 측정과 신축이음부의 상태 등을 조사한 결과는 다음과 같다.

(1) 여수로구조물의 부재두께 측정결과 언체슈트부 두께는 39~52cm로 대체로 설계(50cm)보다 작은 것으로 탐사되었다. 또한 측수로 및 방수로 바닥콘크리트 두께는 45~80cm로 대체로 설계(80cm)보다 작은 것으로 탐사되었다. 이는 주로 시공오차에 의한 것으로 판단된다.

(2) 측수로 및 방수로 바닥 대부분의 신축이음부에서 바닥 하면의 공동으로 추정되는 이상 반사파가 일부 구간에서 탐사되었으며, 옹벽의 경우에는 일부 옹벽 배면의 매립물 또는 소공동으로 추정되는 이상 반사파가 탐사되었다. 이는 신축이음부의 손상부에 물의 침투 등에 의해 신축이음부 하부 지반이 일부 세굴되어 있는 것으로 판단된다.

〈표 1〉 대상구간의 GPR 탐사 분석결과

LINE5(여수로구조물 바닥 신축이음부 부분)	비 고
	· LINE5(EXP.4) 상부 · 사용 안테나 500MHz
	· LINE5(EXP.4) 하부 · 사용 안테나 500MHz
	· LINE5(EXP.4) 5m지점 종단(LINE21) · 사용 안테나 500MHz

3-8. 동적변위측정 및 진동측정

(1) 동적변위 측정 결과

- 1) 동적변위측정을 위한 시험발파는 시공시 일반적으로 적용되는 2가지 발파패턴에 의해 지발당 최대폭약량을 1.6~12.8kg/delay까지 변화시켜가면서 실시하였다.
- 2) 동적변위측정위치는 여수로구조물 중 시험발파위치에서 가장 근접하고, 콘크리트 균열부의 거동과 유사할 것으로 판단되는 측수로 벽체 신축이음부(동적측점 1)와 측수로 바닥 신축이음부(동적측점 2)에서 측정하였다.
- 3) 시험발파위치에서 동적변위측정위치까지의 이격거리는 약 64~73m정도 이격되어 있다.
- 4) 시험발파시 발생하는 진동에 의해 발생한 측수로 벽체 신축이음부와 측수로 바닥 신축이음부의 유간변위량은 -9.24~20.112 μ m로 측정되었다.

〈표 2〉 동적변위 측정 결과

측 점	발파 회차	변위	주파수 (Hz)	진동속도 (cm/sec)	가속도 (g)	비 고
		(mm)				
①	1	0.004283	90	0.2632	0.016	Tension
	2	0.004081	88	0.2338	0.015	Tension
	3	0.020112	111	1.1548	0.098	Tension
	4	0.009885	92	0.5434	0.0336	Tension
②	1	0.002270	72	0.0765	0.066	Tension
	2	0.001651	97	0.0832	0.008	Compression
	3	0.009237	45	0.2485	0.0175	Compression
	4	0.006441	33	0.1930	0.0137	Tension

여기서, 비교의 Tension : 신축이음부의 인장시 측정값

Compression : 신축이음부의 압축시 측정값

(2) 진동측정 결과

- 1) 진동측정을 위한 시험발파는 시공시 일반적으로 적용되는 2가지 발파패턴에 의해 지발당 최대폭약량을 1.6~12.8kg/delay까지 변화시켜가면서 실시하였다.
- 2) 진동측정위치는 여수로구조물 주변지반(진동측점 3)과 여수로구조물의 동적변위측정위치 주변(진동측점 1,2,4,5) 및 여수로구조물 중 가장 손상이 심하게 발생되어있는 제체측 호안옹벽 상단(진동측점 6)에서 측정하였다.
- 3) 시험발파시 발생하는 진동에 의해 발생한 진동속도값은 0.0651~1.17cm/sec로 측정되었다.

〈표 3〉 시험발파시 진동측정 결과

측 점	발파 회차	진동속도(cm/sec)				T(접선성분)			단일성분 중의 최대변위 (mm)	비 고
		벡터합	L	T	V	주파수 (Hz)	가속도 (g)	변위 (mm)		
①	1	0.0699	0.0318	0.0318	0.0667	73	0.0133	0.00149	0.00209(L)	
	2	0.125	0.0492	0.0492	0.124	43	0.0133	0.00161	0.00406(V)	
	3	0.510	0.238	0.117	0.462	28	0.0398	0.00727	0.0185(V)	
	4	0.352	0.233	0.146	0.300	30	0.0298	0.00698	0.0123(V)	
②	1	0.0651	0.0302	0.0413	0.0635	73	0.0199	0.00125	0.00188(L)	
	2	0.125	0.0508	0.0635	0.122	47	0.0166	0.00214	0.00409(V)	
	3	0.516	0.243	0.129	0.457	43	0.0447	0.00622	0.0186(V)	
	4	0.352	0.208	0.130	0.294	28	0.0398	0.00681	0.0124(V)	
③	1	0.270	0.241	0.137	0.178	64	0.0563	0.00331	0.00857(L)	
	2	0.316	0.254	0.195	0.289	47	0.0497	0.00579	0.0111(V)	
	3	1.17	1.08	0.673	1.12	51	0.0199	0.0223	0.0452(V)	
	4	0.829	0.722	0.587	0.787	43	0.0166	0.0259	0.0360(L)	
④	1	0.0730	0.0476	0.0333	0.0683	>100	0.0232	0.00084	0.00205(V)	
	2	0.135	0.0683	0.0365	0.132	26	0.0215	0.00202	0.00413(V)	
	3	0.475	0.278	0.171	0.440	28	0.101	0.00883	0.0174(V)	
	4	0.330	0.276	0.167	0.278	39	0.0779	0.00811	0.0118(V)	
⑤	1	0.0746	0.0508	0.0238	0.0730	>100	0.0182	0.00084	0.00271(V)	
	2	0.148	0.0826	0.0349	0.146	26	0.0199	0.00246	0.00451(V)	
	3	0.508	0.338	0.183	0.476	39	0.0530	0.00801	0.0220(V)	
	4	0.348	0.251	0.149	0.321	37	0.0447	0.00795	0.0142(V)	
⑥	1	0.0953	0.0651	0.0683	0.0667	30	0.0249	0.00310	0.00310(T)	
	2	0.154	0.132	0.121	0.0651	39	0.0315	0.00712	0.00712(T)	
	3	0.618	0.518	0.457	0.362	26	0.0961	0.0271	0.0271(T)	
	4	0.430	0.375	0.300	0.289	22	0.0663	0.0178	0.0178(T)	

표에서 L은 진행성분, T는 접선성분, V는 수직성분을 말함

4. 발파진동의 영향 및 허용기준치 검토

4-1. 발파진동의 영향 검토

(1) 여수로구조물과 지반의 진동속도 응답비 분석

- 1) 시험발파결과 발파시 여수로구조물과 인접한 지반에서 측정된 진동속도에대한 여수로구조물에서 측정된 진동속도의 비 (응답비=구조물에서 측정된 진동속도/지반에서 측정된 진동속도)는 측수로 바닥콘크리트의 지반진동속도가 0.27kine 일 때 0.24~0.28(평균 0.26)이었으며, 지반진동속도가 0.316~1.17kine일 때 0.40~0.47로서 지반진동속도가 0.3kine 정도 이상인 경우에 응답비는 0.40~0.47 정도 되는 것으로 검토되었다.
- 2) 경사방향의 균열이 다수 발생되어 있어 외관상으로 안전성이 저하된 것으로 판단되는 제체측 호안옹벽에서 측정된 진동속도에 대한 응답비는 지반진동속도가 0.27kine일 때 0.35이었으며, 지반진동속도가 0.316~1.17kine일 때 0.48~0.52로서 지반진동속도가 0.3kine 정도 이상인 경우에 응답비는 0.48~0.52 정도 되는 것으로 검토되었다.
- 3) 지반진동속도에 대한 여수로구조물의 진동속도 최대응답비는 지반진동속도가 0.3kine 이상일 경우 0.52 정도로 판단된다.

(2) 진동속도에 따른 진동변위 분석

- 1) 시험발파시 발파진동속도에 따른 구조물의 진동변위를 파악하기 위해 측수로 신축이음부 주변 바닥콘크리트 및 제체측 호안옹벽에서 측정하였으며(진동측점 1,2,4,5,6,) 진동속도에 따른 신축이음부의 유간변위를 측정하기 위해 측수로 벽체(동적측점 1)와 바다(동적측점 2)에서 측정하였다.
- 2) 이는 신축이음부 유간변위가 진동속도에 의해 가장 쉽게 발생될 것으로 예상되기 때문이며, 또한 GPR 조사결과 바닥콘크리트의 신축이음부 하부에는 공동이 다수 존재하는 것으로 확인되어 신축이음부의 변위로 인한 누수는 여수로구조물의 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로 진동속도 및 변위의 측정 위치는 신축이음부 주변으로 선정하였다.
- 3) 시험발파결과 진동속도에 따른 구조물의 진동변위가 가장 크게 발생하는 것으로 측정된 위치는 외관상 균열이 많이 발생되어 불안정한 상태로 평가되는 제체측 호안옹벽(진동측점 6)으로 진동속도에 따른 진동변위관계는 다음과 같다.

$$y = 0.0514x - 0.0003$$

여기서, y = 구조물의 진동변위

$$x = \text{진동속도}$$

예) 진동속도(x)가 0.3kine 일 때, 예상진동변위(y)는 15 μ m

4) 시험발파결과 진동속도에 따른 신축이음부 유간변위는 바닥(동적측점2)에서 진동속도에 따른 진동변위관계와 대체로 유사한 것으로 판단되나 벽체(동적측점 1)는 바닥보다 작은 변위가 발생하는 관계를 갖는 것으로 검토되었다. 바닥(동적측점 2)에서 진동속도에 따른 진동변위의 관계는 다음과 같다.

$$y = 0.0422x - 0.0014$$

여기서, y = 신축이음부 유간변위

x = 진동속도

예) 진동속도(x)가 0.3kine 일 때

예상 신축이음부 유간변위(y)는 11.3 μ m

5) 상기와 같이 분석한 결과 구조물에 발생하는 진동속도가 0.006kine 이상이면 구조물의 진동변위가 발생되고 진동속도가 0.033kine 이상이면 신축이음부 유간에 변위가 발생할 것으로 예상되므로 발파시 발생하는 진동속도는 여수로구조물에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되므로 진동변위 등을 고려하여 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 발파 진동 허용기준치를 설정해야 할 것으로 판단된다.

4-2. 발파진동의 허용기준치 검토

- (1) 00고속도로 건설공사 2공구의 STA. 12+220 340 주변의 노면저수지 여수로구조물에 대한 관련자료 및 현장조사 자료를 검토한 결과 여수로구조물은 현재 제체측 호안옹벽의 콘크리트에 구조적 안전성의 영향을 미칠 수 있는 방사형 균열 발생, 신축이음부 바닥콘크리트 하부의 공동, 축수로 옹벽사면 상부의 암반사면 불안정 등이 발생되어 있음이 확인되어 인접 도로공사 시행을 위한 발파시 발생하는 진동에 의해 여수로구조물은 추가적인 손상을 입을 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 따라서 발파시 발생하는 변위 등을 고려하여 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 발파진동 관리기준치를 설정해야 할 것으로 판단된다.
- (3) 일본 동경대에서 추천한 콘크리트 인장응력을 고려한 발파 진동 관계식을 적용하여 무근콘크리트구조물에 인장균열을 허용하지 않는 최대허용진동치를 산정한 결과 현 상태의 여수로구조물에서 측정된 가장 작은 콘크리트압축강도가 91kgf/cm² 일 때 허용진동치는 2.4kine으로 추정된다. 그러나, 국내 정부기관(서울지하철, 부산지하철)의 발파진동 허용기준치로 일반적인 콘크리트구조물에서 최소허용진동 기준은 1.0kine으로 일본의 추천식에서 산정한 허용진동치 보다 엄격하게 규정하고 있다.

(4) 일반적으로 물분자의 크기는 0.00014 μ m로 아주 미세한 틈에도 물이 통과 하는 것으로 확인되었으나, 국내 시방자료를 검토한 결과 수밀구조물에서 보수가 필요한 콘크리트 균열 폭은 0.1mm로 제한되어 있는 것으로 확인되었다(「건설교통부 제정 콘크리트 표준 시방서」, 1996, (사)대한토목학회, p.139). 따라서 현 상태의 여수로구조물에는 구조적인 안전성에 영향을 미칠 수 있는 균열과 신축이음부의 손상 등이 발생되어 있다는 점과 일정기간동안 지속적인 발파작업이 예상되므로 발파진동에 진동변위는 수밀구조물의 콘크리트 허용 균열폭의 약1/10배(10 μ m) 정도로 미세한 변위가 발생할 경우에는 노면저수지 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

(5) 여수로구조물에 기 발생되어 있는 균열과 유사한 거동이 예상되는 축수로 신축이음부 유간변위가 약 10 μ m 정도 발생되기 위한 여수로구조물의 진동속도는 시험발파결과에 의한 관계식(바닥(동적측점 2) 시험결과)을 적용할 경우 약 0.27kine으로서 여수로구조물과 지반의 진동속도 최대응답비 0.52로 산출하면 지반진동속도는 약 0.52kine 정도 될 것으로 판단된다.

(6) 시험발파결과 제체측 호안옹벽에서 측정된 관계식을 사용하여 여수로구조물의 진동변위가 약 10 μ m일 때 구조물의 진동속도를 구하면 약 0.2kine 정도이며, 이 때 지반진동속도는 0.38kine 정도로 판단된다(여수로구조물과 지반의 진동속도 최대응답비 0.52 적용). 그러나, 발파진동속도에 따른 여수로구조물의 균열폭의 변위는 시험발파결과 구조물의 진동변위보다 작을 것으로 예상되므로 신축이음부 유간변위(약10 μ m일 때)로 검토한 경우의 구조물의 진동속도 0.27kine이 발파시 여수로구조물의 균열폭 거동과 더 유사할 것으로 판단된다.

5. 결론

“00 고속도로 건설공사 2공구” STA. 12+220 340구간 토공사시 발파공사구간에 인접한 노면저수지내 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 발파진동 허용기준치를 선정하기 위하여 여수로구조물의 현 상태를 파악하고 시험발파를 실시하여 측정된 진동속도 및 진동변위를 분석하였으며, 이에따라 제체측 호안옹벽에 기 발생되어있는 균열과 신축이음부 하부에 공동이 발생되어있는 노면저수지 여수로구조물의 안전성에 영향을 미치지 않는 범위(진동허용기준치 0.2kine)내에서 정밀 진동제어 발파를 수행함으로써 효율적인 공사관리를 할 수 있었다.