

낙동강 치수방재와 연안제 주변의 시설물 대책

지 홍 기 (영남대학교 토목도시환경공학부 교수)

1. 서 론

하천의 치수방재는 유역에서 발생하는 홍수유출량을 효과적으로 안전하게 하류로 유하시킬 수 있는 통수능력을 갖추는 일이며, 경우에 따라서는 유역의 홍수유출량을 일시적으로 저류시키거나 하도의 통수단면을 최대화시키는 방법들을 생각할 수 있다. 그러나 유역내 하도주변의 환경에 따라 하폭을 무제한으로 늘릴 수 없는 경우가 많고 하천연변이 개발되면서 용지의 보상비가 높아져 그 매입이 비경제적인 경우가 많다.

그러므로 하천의 치수방재는 유역의 저류기능을 확대하는 방안과 하도정비를 통한 통수능력을 제고시키는 방안으로 나눌 수 있어, 유역과 하도의 주변여건에 따라 적절히 선택하여 치수대책을 수립할 필요가 있다. 즉, 댐을 축조하는 방안 등 유역의 저류기능 확대와 개발지역을 관류하는 하도단면의 확대는 치수방재사업에서 검토해야 할 중요한 방안이다. 그러나 이러한 치수방재사업은 양자의 선택사항이라기 보다는 상호보완적이고 병행실시함으로써 오히려 효과적이고 부가적 가치를 얻을 수 있다.

특히, 낙동강 유역권은 치수방재 분야에 있어서 갖추어야 할 유역내 홍수조절기능을 수행할 댐 등의 저수지 시설이 빈약하고 하도 또한 홍수소통에 매우 불리한 극히 완만한 하도경사를 지니고 있다는 점 등은 결과적으로 이 지역에 홍수피해가 연례적으로 발생하게 되는 큰 이유중의 하나이다. 즉,

낙동강 유역은 한강유역에 비해서 댐에 의한 홍수 조절 능력이 20% 정도에 머물고 있으며, 낙동강 하도연안제 또한 1970~80년에 걸쳐서 대대적인 연안개발사업을 수행하였지만 당시의 경제력과 기술력에 의해서 축조되었던 제방이 현재의 기준으로 볼 때 다소 미흡한 부분이 있었음을 솔직히 시인하지 않을 수 없다.

또한 치수방재사업에서 중요시되어왔던 유역의 홍수조절용 신규댐의 건설이 사회환경 변화에 따라 침체되어 왔고 당시 낙동강 연안개발사업에 의해서 수행되었던 제방은 20~30년이 경과하면서 노후되거나 피로한계 상태에 이르고 있음도 많은 전문가들은 우려해 왔다. 그러나 정부 관계기관에서는 예산부족 및 시민들의 관심부족 등으로 방치되거나 임시미봉책으로 일관해 왔던 점들을 이제는 상기시켜야 할 즈음에 이르렀다고 이구동성으로 제기하고 있는 실정이다.

따라서 본 고에서는 낙동강 유역권의 수계 및 수문특성과 치수방재현황을 살펴보고 지금까지 낙동강 연안에서 빈발했던 제체 붕괴사고의 원인이 되었던 제체의 침윤과 파이핑현상 그리고 제체의 파괴 메카니즘을 검토하였으며, 특히, 제체 파이핑현상의 주원인이 되는 제체내의 구조물주변의 침윤과정과 제체 변형을 검토하고 제체와 구조물주변의 변형에 대한 정기적인 감시와 안전을 평가할 수 있는 모니터링의 사례를 살펴보았다. 그리고 향후 낙동강 연안제 주변 시설물의 보강대책을 소개 및 제시하고자 한다.

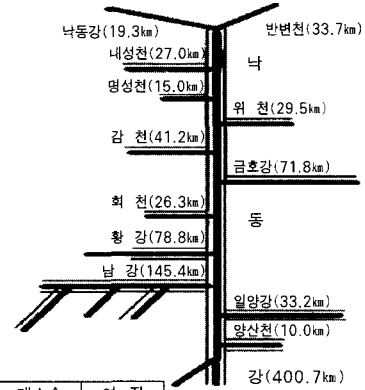
2. 낙동강 유역권의 수계 및 수문특성

2.1 수계구성

낙동강 유역은 동경 127° 29' ~ 129° 18', 북위 35° 03' ~ 37° 13' 사이의 남동부에 위치고 있으며, 경상남·북도 대부분과 전라남·북도 및 강원도 등의 일부를 포함하는 우리나라 제 2유역으로서 그 유역면적은 전 국토의 약 1/4에 해당하는 23,859.3 km²이고 낙동강본류의 유로연장은 528.5km이다.

유역의 북쪽은 한강유역과 접하고 서쪽은 금강 및 섬진강 유역과 그리고 동·남쪽은 동해 및 남해와 접해 있으며, 유역의 동서장은 약 150km이고 남북장은 약 250km로서 장방형의 유역형태를 지니고 있다. 낙동강은 동쪽 태백산맥, 서북쪽의 속리산·덕유산·지리산으로 이어지는 소백산맥으로 둘러싸여 있어 낙동강 본류하도는 낙동강유역의 거의 중심부를 관류하고 있다. 유로형태는 지형에 지배를 받아 최단거리로 유하하지 못하고 유향을 우회하여 남해안에 유입하고 있다. 낙동강 유역의 수원은 강원도 태백시의 태백산(EL. 1,546m)에서 발원하여 남류하면서 안동댐에 유입한 후에 안동댐 지점에서 유로가 서쪽으로 유향을 1차 바꾸어 서류하면서 반변천, 위천이 합류하고 경상북도 예천군 풍양면 지점에서 내성천이 합류한 후에 2차 유향을 바꾸어 남류를 지속하면서 낙동강 제 1지류인 영강, 위천, 감천, 백천, 금호강이 차례로 합류하고 있다. 하류부는 경상남도 창녕에서 남강이 합류하여 유향을 바꾸어 동류하다가 경상남도 밀양군 삼랑진에서 밀양강과 합류한 후에 다시 유향이 남서류로 바뀌면서 양산천이 합류하고 부산시 사하구에 위치한 하구둑 지점에서 남해안에 유입하고 있다.

그리고 낙동강 유역의 행정구역은 부산광역시 및 대구광역시를 비롯하여 경상남·북도, 전라남·북도 및 강원도 일부를 포함하고 있어 총 2개 광역시와 5개도를 포함 또는 인접하고 있다. 낙동강 본류 상류부 유역의 행정구역은 대구광역시를 포함한 경상북도, 강원도 일부를 포함하고 있으며, 하류부 유역은 부산광역시를 포함한 경상북도 일부와 경상남



표시	구분	개소수	연장
———	국가	10	829.5
———	지방	20	190.5
	합계	20	1,020.0

그림 1. 낙동강 수계도

도 전라남·북도를 포함하고 있다.

한편 용수공급을 낙동강 본류에 의존하고 있는 동해안의 형산강, 태화강 및 회야강 유역은 포항과 울산을 축으로 동해안 공업벨트를 형성하여 보다 많은 수자원을 필요로 하고 있고, 남해안 지역은 하천이 거의 발달하지 못하여 마산 창원 김해 등의 남해안 공업벨트와 도서지역에서 용수수요의 전량을 낙동강 본류에 의존하고 있다. 그리고 낙동강 유역권의 용수공급과 홍수조절을 위해서 낙동강 상류에는 안동댐과 임하댐이 건설되어 있고 중 하류에는 합천댐과 남강댐이 건설되어 있으나 용수공급이나 홍수조절 능력 면에 있어서 낙동강 유역은 한강유역에 비해서 저수시설이 크게 부족한 실정이다.

2.2 하도특성

낙동강 본류 하도의 하상경사는 1/1,000~1/7,000으로서 비교적 완만한 편이며, 하상경사를 조사하면 다음 표와 같다. 특히, 고령교 상류인 왜관수위표~고령교수위표 구간의 하상경사는 1/4,400이며, 고령수위표~남강합류점 구간의 하상경사는 1/7,000으로서 매우 완만한 하상경사를 이루고 있다. 특히, 남강 합류부에서 밀양강 합류부까지의 하도경사는 1/10,900으로서 낙동강 본류하도의 홍수소통 능력이 크게 떨어지고 내수배제

표 1. 낙동강 본류 하도구간별 하상경사

하 도 구 간	하도경사	비 고
반변천 합류부 ~ 미 천 합류점	1/1,100	안동·임하댐
미 천 합류부 ~ 달 지 수위표	1/1,900	
달 지 수위표 ~ 낙 동 수위표	1/2,200	
낙 동 수위표 ~ 왜 관 수위표	1/3,400	
왜 관 수위표 ~ 고령교 수위표	1/4,400	
고령교 수위표 ~ 남 강 합류부	1/7,000	합천댐
남 강 합류부 ~ 밀양강 합류부	1/10,900	남강댐
밀양강 합류부 ~ 하 구 독	1/12,400	

에 있어서 심각한 어려움을 주고 있다.

2.3 수리 수문특성

2002년 8월에 발생한 두차례의 집중호우에서 낙동강 유역에 많은 비가 내린 것도 사실이지만 피해의 규모가 타 유역에 비해 훨씬 컸던 데에는 낙동강 유역이 지니고 있는 구조적인 문제점이 있다. 한강 유역의 소양강댐이나 충주댐의 경우 당시의 상황에서 각각 430mm와 130mm의 비가 더 오더라도 댐의 수문 방류없이 조절을 할 수 있는데 반해, 낙동강 유역의 임하댐이나 남강댐은 80mm 전후의 강우만 더 내려도 수문방류가 불가피해지는 상황이다. 또한 아래 표에서 보는 바와 같이 각 유역에 다목적댐을 건설하여 확보된 유역비 홍수량(홍수조절용량/유역면적)이 낙동강유역은 23으로 한강유역의 54에 비해 절반도 되지 않는 수준인데다 적정 유역비 홍수량인 100에 비해서는 턱없이 부족한 것이 낙동강유역의 현실이다.

뿐만 아니라 낙동강유역의 하류하도는 매우 완만하여 하상구배가 1/12,400인데 비해서 한강하류 팔당댐부터 하구까지의 하상구배는 1/6,000~7,000

로서 비교적 경사가 급한 편이다. 이와 같이 완만한 하도경사는 홍수의 배제가 지연되는 불리한 지형적인 조건과 과거부터 추진되어 온 제방 축조 위주의 방재대책으로 인한 하천의 바닥이 제내지보다 높은 하천의 천정화, 제방의 노후화 및 축제로 사용하기엔 취약한 토질 조건 등 여러가지 구조적인 문제들이 결국은 낙동강유역의 홍수피해를 확대시킨 원인이었던 것으로 생각된다.

3. 낙동강 유역권의 치수방재 현황

3.1 하천연장 및 정비방안

낙동강 유역의 토지 및 수자원을 그 지역특성에 알맞도록 개발함으로써 한·수해를 방지하고 홍수로부터 재산과 인명을 보호하고 식량증산과 더불어 국가발전에 이바지함을 목적으로 1978년부터 낙동강 본류 연안제 축조사업이 추진되었다. 본 낙동강 연안개발사업의 추진에 있어서 당시에 건설부/산업기지개발공사는 홍수조절 및 배수부문을 위해 제방 축조, 펌프장설치, 용지보상, 수문조사 등을 실시하였고, 농진공은 농업부문개발을 위해 관개시설, 경지정리, 개간, 용지보상을 실시하였다. 또한 농진청에서는 농업지원시설 확장을 위해 농업지도원과 농민훈련센터를 건립하고, 농협은 저장시설 및 동력경운기를 구입하여 본 사업의 목적달성을 위한 공정을 담당하였다.

그러므로 낙동강 연안개발 1단계 사업은 정부의 많은 부서에서 참여한 국가적인 대역사였으며, 당시에 이러한 대규모 사업을 추진할 수 있었던 배경에는 당시에 SOC사업의 중요성이 요구되고 있었음에도 불구하고 국민의 생명과 재산을 보호하겠다

표 2. 우리나라 주요 하천유역별 수문량

구 분	단 위	한 강	낙동강	금 강	섬진강	비 고
1) 유역면적	㎢	26,018	23,859	9,810	4,896	적정유역비 홍수량 : 100mm
2) 수자원총량	억㎥	339	282	125	69	
3) 홍수조작용량	억㎥	13.9	5.5	3.9	1.1	
4) 유역비홍수량(3)/1)	mm	54	23	40	23	
5) 수자원총량비홍수량(3)/2)	mm	4.1	1.9	3.1	1.6	

일반기사

낙동강 치수방재와 연안제 주변의 시설물 대책

는 철저한 국가위기관리 의식의 높은 수준을 되돌아 볼 수 있는 좋은 사례라 할 것이다.

낙동강 유역권의 주요 수계는 표 3과 같이 낙동강 본류수계를 비롯한 형산강수계, 태화강수계, 회야강수계, 낙동동해수계 및 낙동남해수계로 구분되고 있으며, 이들 각 수계는 하천정비기본계획 수립 여부에 따라 수립구간, 수립예정구간 및 수립불필요구간으로 나눌 수 있고 소요하천정비 상태는 완전개수와 불완전개수(보강 및 신설)로 나눌 수 있다.

낙동강수계에서 하천정비기본계획이 수립되었거나 수립이 불필요한 구간은 국가하천이 824.16km, 지방1하천이 191.00km, 지방2하천이 6,369.94km로서 합계 7,385.10km이다. 그리고 하천정비가 필요한 곳의 연장은 국가하천이 837.62km, 지방1하천이

212.80km, 지방2하천이 7,175.58km로서 합계 8,226.00km에 이르고 있다. 한편 하천정비가 완료된 구간은 국가하천 530.17km, 지방1하천 166.46km, 지방2하천 3,400.77km, 합계 4,097.40km에 불과한 실정이다. 하천정비가 완료되지 못한 구간 중에서 보강해야 할 구간의 연장은 국가하천이 234.48km, 지방1하천이 6.40km, 지방2하천이 1,128.52km로서 합계 1,367.60km에 이르고 있다. 그리고 제방을 신설해야 할 구간은 국가하천이 72.97km, 지방1하천이 41.74km, 지방2하천이 2,646.28km로서 합계 2,761.99km에 이르고 있다.

따라서 앞에서 언급한 바와 같이 지방하천(1급 및 2급)의 경우는 하천정비계획이 아직까지도 미수립되어 있는가 하면 기존의 정비계획이 수립되어

표 3. 낙동강 유역권의 소요하천정비 현황

구분	하천정비기본계획										소요개수(km)	소요개수(km)	불완전개수(km)	
	수립구간		수립예정구간		수립불필요구간		계		보강	신설				
	개소수	연장(km)	개소수	연장(km)	개소수	연장(km)	개소수	연장(km)						
낙동강수계	국가	10	695.91	1	2.00	4	126.25	10	824.16	837.62	530.17	234.48	72.97	
	지방1	9	146.60	3	44.40	-	-	10	191.00	212.80	166.46	4.60	41.74	
	지방2	154	1,821.33	730	4,548.61	-	-	781	6,369.94	7,175.58	3,400.77	1,128.52	264.628	
	소계	173	2,663.84	734	4,595.01	4	126.25	801	7,385.10	8,226.00	4,097.40	1,367.60	276.099	
형산강수계	국가	1	36.00	-	-	-	-	1	36.00	62.05	59.90	1.90	0.25	
	지방2	3	44.50	29	201.25	-	-	29	245.85	291.46	238.87	0.93	51.66	
	소계	4	80.50	29	201.25	-	-	30	281.75	353.51	298.77	2.83	51.91	
태화강수계	국가	1	11.60	-	-	-	-	1	11.60	14.98	13.48	-	1.50	
	지방1	-	-	1	13.90	-	-	1	13.90	27.00	26.50	-	0.50	
	지방2	14	83.42	48	217.50	-	-	59	300.91	479.41	227.34	-	252.07	
소계	15	95.02	49	231.40	-	-	61	326.42	521.39	267.32	-	254.07		
회야강수계	지방2	4	51.20	15	47.80	-	-	18	99.00	137.65	63.81	1.80	72.04	
	소계	4	51.20	15	47.80	-	-	18	99.00	137.65	63.81	1.80	72.04	
낙동동해수계	지방1	2	26.90	1	0.40	-	-	2	27.30	37.10	29.48	-	7.62	
	지방2	37	281.53	117	707.09	1	2.00	136	990.62	1,068.54	653.27	80.92	334.35	
	소계	39	308.43	118	707.09	1	2.00	138	1,017.92	1,105.64	682.75	80.92	341.97	
낙동남해수계	국가	1	10.38	-	-	-	-	1	10.38	1.08	-	-	10.8	
	지방2	39	207.50	130	420.10	-	-	154	627.60	1,121.59	500.30	240.24	381.05	
	소계	40	217.88	130	420.10	-	-	155	367.98	1,122.67	500.30	240.24	382.13	
계	국가	13	753.89	1	2.00	4	126.25	13	882.14	915.73	603.55	236.38	75.80	
	지방1	11	173.50	5	58.70	-	-	13	232.20	276.90	222.44	4.60	49.86	
	지방2	251	2,489.48	1,069	6,142.35	1	2.00	1,177	8,633.86	10,274.23	5,084.37	1,452.41	3,737.45	
	소계	275	3,416.87	1,075	6,203.05	5	128.25	1,203	9,748.17	9,748.17	5,910.36	1,693.39	389,311	

있는 경우에도 불완전개수구간이 많고 시설은 물론이고 보강해야 할 구간이 총연장 1,693.39km에 이르는 것으로 나타났다. 이러한 하천정비사업은 지방자치단체의 재정자립도로 볼 때에 중앙정부의 전폭적인 지원이 불가피하므로 하천치수사업은 국가차원에서 국책사업으로 추진해 나가야 할 것이다.

3.2 연안제 유실 및 붕괴위험지구 현황

2002년 제15호 태풍 '루사'가 강타하면서 낙동강 유역의 제방 110여 곳이 붕괴되거나 유실된 것으로 조사되고 있으나 나머지 제방의 경우도 안전진단 등의 정밀조사를 거칠 경우에 보다 많은 제방들이 부실하거나 허약한 상태로써 그 보강이 시급할 것으로 예상되고 있다. 특히, 낙동강 본류연안이나 지류가 합류하는 합류부 연안이 매우 취약한 것으로 나타나고 있으며, 금년 8월 상순과 하순에 발생한 호우로 제방이 붕괴·유실된 경우만 하더라도 함안군 백산제, 합천군 광암제와 가현제는 엄청난 침수피해를 입었다. 그 중에서 가현제는 8월 상순에 붕괴된 제방을 임시복구하면서 서둘렀지만 제 15루사태풍으로 가옥까지 침수되는 사태가 발생했다. 경남 창녕군과 의령군에서도 독 곳곳에서 물이 새는 등 붕괴조짐을 보여 비상이 걸렸다.

경북지역에서는 도심이 물에 잠긴 김천시와 35곳의 제방이 유실 또는 붕괴된 상주가 최대 피해지역이었다. 반면천 부근의 영양과 청송지역도 10곳이 넘는 제방이 피해를 보았고, 위천 부근의 의성지역도 제방피해가 17곳에 달했다.

청도 운문면은 인근 소하천을 가로지르는 신원교를 설치하면서 만든 임시가교가 물흐름을 막아 제방이 무너졌다. 이로 인해 경북지역에서는 2,400여 가구와 농경지 1만4,000여ha가 침수나 파손 등의 피해를 보았다.

낙동강 유역인 경남북 지역에서 이번 홍수로 제방이 무너지거나 유실된 곳은 경북 100여곳, 경남 15곳이며, 소하천까지 포함하면 200곳이 넘는다. 이번 피해가 주로 경북지역에 집중된 것은 낙동강의 지천(枝川)이 경북지역에 집중적으로 많기 때문이다.

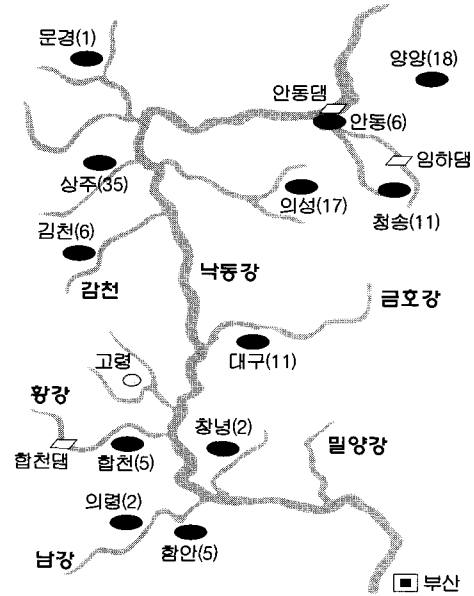


그림 2. 낙동강 연안제 붕괴·유실 지점

3.3 유역의 홍수조절 능력

1) 낙동강 연안제와 댐 저수지

낙동강 본류와 본류에 합류하는 주요지류 하류부에 위치한 연안제는 대부분 70~80년대에 낙동강 연안개발사업의 일환으로 축조되어 체체의 노후, 하상퇴적 및 유로의 변경 등으로 호안이 심하게 세굴되고 있으며, 사업 당시에 체체가 모래질토로 축조되었다. 그리고 체내지 대부분이 저지대로서 파이프 현상에 따른 제방붕괴가 빈번히 발생되고 있어 항구적인 대책 수립이 시급히 요구되고 있다. 그러나 지금까지는 치수사업이 도로, 철도, 공항, 항만 등의 사업에 밀려서 체계적으로 추진되지 못하고 매년 응급복구에만 급급해온 것이 현실이다.

그러나 이번에 발생한 태풍 루사에 의한 홍수를 살펴보면 낙동강 수계의 다목적 댐들에 의한 홍수의 조절을 주목할 만 하다. 한국수자원공사에서 발표한 낙동강 유역의 다목적댐 홍수수문 관리자료를 살펴보면 2002년 8월 상순의 호우기간 동안 다목적댐으로 유입된 총 28.61억^m³ 중에서, 14.75억^m³을 방류하고 13.86억^m³을 댐에 저류하여 홍수조절

■ 일반기사

낙동강 치수방재와 연안제 주변의 시설물 대책

을 수행함으로써 댐하류부의 홍수피해를 줄이는데 많은 기여를 하였으며, 다목적댐의 저수율이 호우 이전의 44%에서 82%로 상승하였다. 특히, 안동댐은 최대유입량 4,265m³/sec, 밀양댐 873m³/sec, 임하댐이 2,617m³/sec, 남강댐이 5,439m³/sec를 각각 기록하였다.

2) 낙동강 수계 다목적댐의 운영

2002년 8월 4일부터 16일까지 12일간에 걸친 집중호우로 낙동강 유역의 다목적댐 유역에는 평균 450mm의 강수량이 내렸고, 밀양댐, 안동댐에 460~770mm의 많은 강우가 내렸다. 특히, 안동댐을 비롯한 5개 댐은 강우강도나 지속간에 있어서 댐운영 이후 최대강우를 기록하였다. 그럼에도 불구하고 낙동강 수계 4개 다목적댐은 2002년 8월 상순에 발생한 집중호우시에 낙동강 하류 수위상승에 따른 침수피해 경감을 위해 댐의 저류능력을 최대한 발휘하여 방류량을 탄력적으로 조정하면서 홍수조절을 성공적으로 수행하였다. 강우 초기 발전방류에 의해 수위조절을 하던 낙동강수계 다목적댐은 중 하류부의 수위가 위험수위에 육박함에 따라 남강댐은 분류방류를 중지하고 사천만으로 유역변경 방류만을 시행하고, 안동 임하 합천댐은 8월 11일 06:45을 기해 발전방류를 중지하고 유입되는 홍수량을 전량 댐에 저류하였다. 댐유역에 더 이상의 추가 강우가 없을 것으로 예보됨에 따라 완전한 배수가 되지 않고

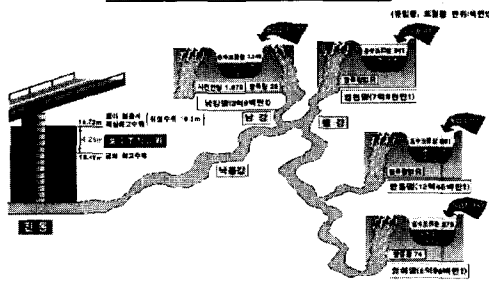
있는 상황에서 낙동강 하류부의 신속한 수위저하를 위해서 댐의 안전을 위한 최소한의 방류량을 8월 16일 10:00부터 방류하기 시작하였으며, 합천댐, 안동댐은 발전 방류량을 줄이거나 중지하고, 임하댐은 여수로 방류량을 점차적으로 줄여 8월 16일 23:00에 수문방류를 조기에 종료하였다.

3) 낙동강 수계 다목적댐의 홍수조절 효과

한국수자원공사의 분석에 의하면 2002년 8월 4일~15일 호우기간 동안 다목적댐으로 유입된 총유입량 28.61억m³ 중에서 14.75억m³을 방류하고 13.86억m³을 댐에 저류하여 그림 3.2.2와 같이 홍수조절을 수행함으로써 댐하류부의 홍수피해 절감에 많은 기여를 하였으며, 다목적댐의 저수율이 호우 이전의 44%에서 82%로 상승하였다.

따라서 낙동강 수계 4개 다목적댐은 낙동강 하류 수위상승에 따른 침수피해 경감을 위해 댐의 저류능력을 최대한 발휘하여 방류량을 탄력적으로 조정하여 홍수조절을 성공적으로 수행하였다. 그리고 8월 4일~15일 홍수시 낙동강수계의 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 등 4개 다목적댐의 연계운영을 통하여 그림 3.2.3과 같이 진동수위표 지점의 최고 수위를 4.25m 저하시켰고, 위험수위 기준시 진동지역 침수시간을 95시간 정도 단축시킨 것으로 이번 홍수에서 낙동강 수계의 다목적댐들은 홍수피해경감에 결정적인 역할을 수행했으며, 그 효과 또한 지대함을 알 수 있었다.

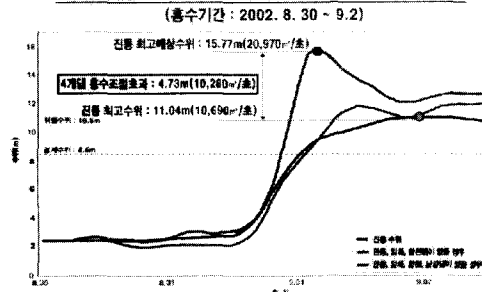
낙동강수계 홍수조절 개념도



자료 : 한국수자원공사 제공

그림 3. 낙동강 수계 홍수조절 개념도

낙동강수계 다목적댐 홍수조절효과(진동지역)



자료 : 한국수자원공사 제공

그림 4. 낙동강 수계 다목적댐 홍수조절 효과

4. 낙동강 연안제 파이핑 현상과 방지대책

4.1 제체의 침윤과 파이핑 현상

1) 제체의 침윤현상

제내지와 제외지의 수위차가 클 때는 침윤에 의해서 유선이 발달하게 되고 이는 제방의 붕괴로 연결되어 인적, 물적으로 많은 피해를 주게 된다. 이러한 문제의 원인과 대책을 모색해 보면 다음과 같다.

제체는 수두차에 의하여 침투수가 제외지측으로부터 제방단면을 통하여 제내지측 비탈면 및 제내지에 도달하며, 일단 침투가 시작되면 적극적으로 유로가 형성되어 파이핑 현상으로 발전하여 제체의 안정성을 크게 위협하게 되고, 붕괴 현상까지도 유발할 가능성이 높게 된다. 특히, 제체나 제체하의 지반이 투수성이 큰 모래질 지반일 경우 파이핑 검토와 동시에 제체가 소요의 조건을 만족하지 못할 경우에 적절한 대책공법을 통한 안전성의 확보가 필요하다.

제체의 침윤현상은 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 제체가 토사질로 축조되어 있을 때, 수위가 상승하게 되면 제내지의 수위 또는 지반보다 크게 높아지게 된다. 이때, 제외지의 수위는 제체에 수압으로 작용하게 되고 수압은 제체에 침투수를 발생시켜 침윤선을 형성하게 된다. 또한 제체 축조재료의 조직이 치밀하지 못할 경우에는 투수계수가 크게 되어 침윤선의 발달이 용이해지고 이들 침윤선은 급기야 파이핑의 원인이 된다.

2) 제체의 파이핑 발달과정

제체에서 침윤선이 발달하여 파이핑이 형성되는 과정을 살펴보면 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 투수성제방과 난투수성 지반이 접하는 불연속면 사이에서 유수위 흐름이 발달하게 된다. 따라서 제체의 파이핑 발달과정을 크게 4가지로 나눌 수 있다.

- ① 홍수에 의해 지하수압이 크게 되어 표토를 반구형으로 솟아 오르게 하는 가마가 발생한다.
- ② ①에서 수압이 더욱 커지면 대량의 물과 함께 표토를 파괴하며, 토사가 분출되는 보일링이 발생한다.

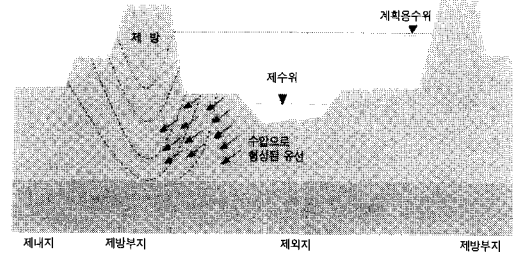


그림 5. 제방의 계획홍수위와 유선 형성

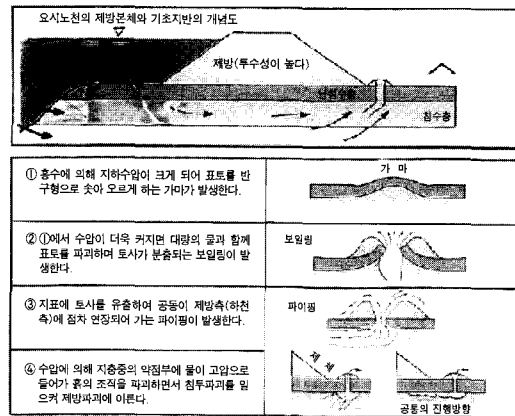


그림 6. 제체의 파이핑 발달과정

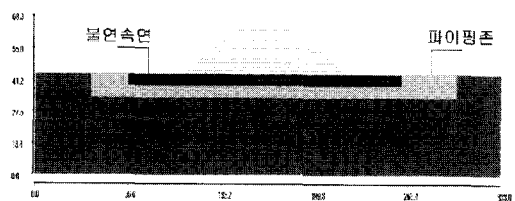


그림 7. 제체의 불연속면과 파이핑존

- ③ 지표에 토사를 유출하여 공동이 제방측(하천측)에 점차 연장되어 가는 파이핑이 발생한다.
- ④ 수압에 의해 지층중의 약점부에 물이 고압으로 들어가 흙의 조직을 파괴하면서 침투파괴를 일으켜 제방파괴에 이르게 된다.

3) 제체 및 지반 누수현상

모래질 토사를 이용하여 제방을 조성할 경우 제체에 작용하는 수압으로 인해서 제체를 구성하는

흙의 공극으로 물이 침투하면서 유로를 형성하게 되며, 점차적으로 투수압이 증가하여 모래질 토사의 중량보다 커지면 미립 토사의 유실이 촉진되는 보일링이 발생하게 된다.

따라서 결국에는 제체를 구성하는 토사의 투수계수가 증가하여 파이핑 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상이 반복, 지속되면 제체를 조성하는 흙은 점착력이 감소하게 되고 제방은 안전성을 상실하게 되어 붕괴될 수 있는 위험한 상태에 이르게 된다. 이러한 일련의 현상에 대한 근본적 원인을 살펴보면 제체의 누수와 지반의 투수로 구별할 수 있고 각 원인에 대한 예측할 수 있는 경우들은 다음과 같다.

① 제체 누수

- 제방단면이 작은 경우
- 제방이 사질토/조립토를 다량 포함하고 제외지 또는 중심부에 차수벽이 없는 경우
- 제체를 충분히 다지지 않은 경우
- 두더지 등의 야생 동물에 의해 구멍이 생길 경우
- 제체내 구조물의 접촉부가 이질재료로서 공극이 발생하여 유로로서 작용될 수 있는 경우

② 지반 누수

- 지반이 투수성이 큰 모래층, 자갈층일 경우
- 고수부지 부근의 표토가 세굴되어 투수층이 노출된 경우
- 제외지 비탈면 부근의 골재채취로 투수층이 노출된 경우

③ 파이핑 현상

투수수압이 상향으로 되어 유효응력이 "0"이 된다면 모래지반에서는 분사현상이 발생한다. 동수경사가 어느 한계를 넘으면 유수에 의해 지표면의 흙이 침식되고, 이로 인해 유로가 더 짧아지기 때문에 동수경사가 점점 더 커져서 유로를 따라 마치 파이프처럼 공동이 생긴다. 이와 같은 현상을 파이핑(Piping)이라 한다.

유선의 출구에서 동수경사는 유선망을 그려서 결정할 수 있다. 유선망은 수리구조물의 뒷굽의 유선출수에서 가장 조밀하게 그려지므로 동수경사는 이 부근이 가장 크다. 따라서 파이핑은 이 곳에서부터

국부적으로 일어나기 시작한다. 파이핑이 일단 시작되면 상당한 거리까지 계속해서 진행되므로 결국에는 제방의 파괴를 가져올 수 있다.

4.2 제체의 파괴 메카니즘

제체의 파괴과정에서 제방은 그림 8에서 보는 바와 같이 홍수시에 수충작용, 침투작용, 월수작용 등이 발생하게 되며, 제체의 파괴는 이들의 작용이 점점 커지면 파괴에 이르게 된다.

- ① 수충작용 : 홍수시에 유수가 하천의 만곡부 혹은 수충부에 있는 제방에 충돌하여 파괴되는 작용으로서 제방과 법면부에 세굴 등이 일어나 제체의 파괴 원인이 된다.
- ② 침투작용 : 강우와 홍수에 의해 물이 제체 속으로 침투하여 제방을 물로 포화 혹은 포화에 가까운 상태(침윤상태)로 만들어 파괴되는 작용으로서 법면활동이 발생하거나 침투수가 주거지에 토사와 함께 유출(누수)되어 제방파괴의 원인이 된다.

수충작용	홍수시에 유수가 하천의 만곡부 혹은 수충부에 있는 제방에 충돌하여 파괴되는 작용	→	제방과 법면부에 세굴 등이 일어나 제방파괴의 원인이 된다.
침투작용	강우와 홍수에 의해 물이 제체 속으로 침투하여 제방을 물로 포화 혹은 이에 가까운 상태(침윤상태)로 만들어 파괴되는 작용	→	법면활동이 발생하거나 침투수가 주거지에 토사와 함께 유출(누수)되어 제방 파괴의 원인이 된다.
월수작용	하천수의 수위가 천단(제방의 정상)보다도 높아져서 유수가 제방을 넘어 주거지로 흘러나와 파괴되는 작용	→	천단과 안쪽법면을 씻내어 파괴의 원인이 된다.

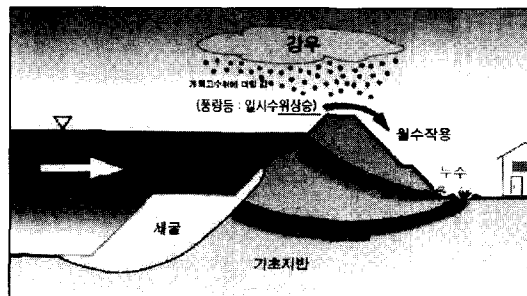


그림 8. 제방에 작용하는 대표적인 홍수현상

③ 월수작용 : 하천수의 수위가 천단(제방의 정상)보다도 높아져서 유수가 제방을 넘어 주거지로 흘러나와 파괴되는 작용으로서 천단과 안쪽법면을 씻어내어 파괴의 원인이 된다.

1) 수충작용

홍수시에 유수가 하안에 충돌하는 현상이며 제외지의 제각부와 법면부에 세굴 등이 일어나 제방파괴의 원인이 된다. 유로 등 평면형상(굴곡, 만곡 등), 하상형상, 하천구조물의 배치상태 등에 따라 수충부가 형성되는 경우에 이 곳에서 침식이 발생한다. 하지만 직선하도라도 호안의 불연속부와 하도의 변화부에서는 마찬가지로 제외지에 접한 면에서 유수의 속도의 차와 와류의 발생에 의한 경우도 있다.

또한 제각부의 하상이 세굴되어 호안의 기초부가 씻겨져 기초지반의 유출이 일어나 그 위에 제체토가 침하 및 유출되어 호안기초의 주변전체가 이완되면서 호안전체가 손상되는 경우가 있다.

2) 침투작용

하천수가 제체내를 흘러 제방을 약화시키는 현상이며, 홍수시 제체가 포화상태에서 생기는 대표적인 현상이다. 홍수시에 제체에 있어서 생기는 침투작용의 대표적인 경우를 보면 다음과 같다.

- ① 하천수가 제체에 침투하는 경우
- ② 기초지반의 파이핑에 의해 침투하는 경우

이들의 현상은 제방의 조건(제체의 형상과 토질, 기초지반의 형상과 토질), 외력의 조건(강우, 하천수의 작용)에 의해 다르다. 예를 들어 강우량이 클수록 또는 홍수시의 하천수위가 높아 고수위의 연속시간이 길수록 제방의 안전성에 있어서 불리하게 된다.

3) 월수작용

홍수시의 수위가 제방의 천단보다도 높아져서 유수가 제내지측으로 넘쳐나는 현상이며 파제원인의

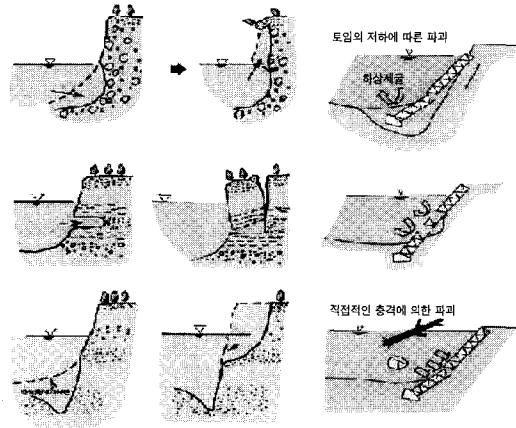


그림 9. 호안의 침식원인

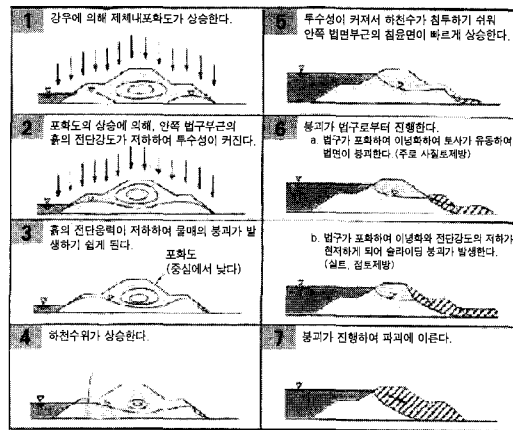


그림 10. 법면 활동에 의한 제방파괴의 과정

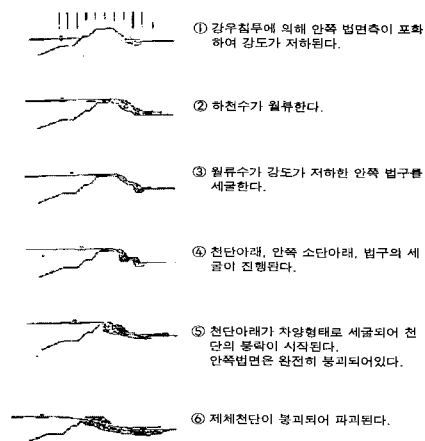


그림 11. 월수에 의한 파제과정의 모식도

대부분이 월수작용에 의한 것이다. 그림 11은 월수 작용에 의한 파쇄과정을 도시한 모식도로서 하천수위가 제체의 천단을 넘어 월류되었을 때의 제체 파괴과정을 나타내고 있다.

4.3 구조물 주변 제체변형

1) 구조물 주변의 침윤과정 검토

구조물 주변의 제방에서 제체와 구조물이 접하는 면은 불연속면으로서 수리역학적으로는 항상 불안정하게 되고 있어, 구조물 주변의 제방이 항상 약점이 되고 있다. 즉, 흙 구조물인 제방을 횡단하여 설치되는 수문, 통문 등은 제방으로서의 기능을 유지하면서 제내·외지에 유수의 통로 역할을 수행해야 하기 때문에 접속되는 제방을 포함하여 홍수에 대해 약점이 되지 않도록 특별히 배려해야 한다.

이를 위해서는 수문 및 통문이 구조적으로 완벽해야 하지만 동시에 주변 제방의 보호 관점에서 호안과 고수부 보호공의 안전에 대해서 제체로서의 기능을 다해야 한다. 응급대책사업으로서 수행되는 공사에서는 기존의 수문 및 통문에 대해서 완벽한 수준의 제체기능을 확보하도록 각종의 대책을 취해야 한다. 특히, 수문 및 통문은 제체의 재료와 불연속면을 형성하고 있어 중량, 강성 등에 있어서 상이하여 밀착이 어렵다. 그러므로 지지말뚝 기초의 경우에는 구조물 저판 주변에 공동이 발생하는 사례가 많이 발생되고 있고 누수와 파이핑에 의한 피해 사례도 흔히 볼 수 있다.

따라서 외국에서는 통문의 신설, 개축을 실시함에 있어 말뚝기초는 금지되고 있으며, 원칙적으로 유연한 지지구조를 추천하고 있다. 그러나 이미 말뚝기초로 시공된 통문은 많이 존재하고 있어, 하천 제방을 정비함에 있어서 기존 구조물의 처리에 세심한 주의가 요망되고 있다.

본 고에서는 기존의 말뚝기초로 시공된 통문을 중요한 대상 구조물로 삼아 구조물 주변의 제방정비 및 보강방안을 검토하였으며, 구조물 주변 제방의 침투로 인한 구조물 주변의 공동화 및 이완에 따른 누수에 대한 안전성의 평가 및 대책에 대하여 검토하였다.

2) 구조물 주변제방의 모습

① 안정성의 목표

통문 등의 구조물 주변은 제방의 잠재적인 약점이 될 수 있으므로 연속적인 제방과 동등 이상의 안전성을 지니게 할 수 있도록 해야 한다. 즉, 하천제방은 치수방재 구조물로서 그 안전성은 일련의 구간으로 파악해야 할 필요가 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 수로박스 및 통문 등의 제방 횡단구조물은 기초지반이 연약한 곳에 만들어지는 경우가 많고, 말뚝기초의 경우에는 구조물 주변 제방에 공동화가 발생하여 홍수시에 누수의 발생과 파이핑 등의 발생 원인이 되어 제방의 안전성을 위협하는 경우도 적지 않다. 더구나 연약지반 상에 지지말뚝 기초로 시공된 통문에 있어서는 응급대책에 의한 그라우트 등의 충진을 실시해도 그 후 침하가 계속되어 공동이 일어나고 공동을 충진했다고 하더라도 재발이 발생하는 경우가 많다.

따라서 연약지반상에 지지말뚝 기초로 시공된 수문, 통문에서의 공동화는 진행성이라는 것을 인식하여 지속적이고 적절한 모니터링과 필요에 따라 보강대책을 실시하여 통문주변 제방이 연속되는 일반 제방보다도 약점이 되지 않게 적절한 조치를 취하는 것이 중요하다. 즉, 통문과 수문을 설치하는 곳은 제방의 약점이 된다는 것을 사전에 인식하고 이를 위해 구조물 주변 제방을 대상으로 안전점검과 평가를 정기적으로 실시해야 하며, 제방이 기능 저하가 일어난 장소에 있어서는 적절한 보강대책을 실시할 필요가 있다. 또한 모니터링을 지속적으로 실시하여 전술한 바와 같이 정기적인 점검을 통해서, 평가 및 대책을 설계 및 시공 등에 반영시키는 것도 중요하다.

② 안전성의 평가

구조물 주변 제방의 침투에 대한 안전성은 제방 및 구조물의 제원, 재해를 입은 이력, 외관 및 구조물내의 상황, 연통시험결과 및 전문가의 조언 등을 종합적으로 판단하여 평가해야 한다.

○ 구조물 주변 제방의 변형

구조물 주변 제방에서 변형발생과 수로의 형성에
는 다양한 요인이 관계되지만 아래와 같은 현상의 진
행이 수로를 형성하게 되는 주요요인이 되고 있다.

- 제방하중에 의한 지반의 압밀 및 제방의 침하
- 광역적인 지반함몰에 의한 지반의 침하
- 외수위의 주기 및 비주기적인 변동(고수위의 반복, 감소하천, 댐, 수문하류)
- 축재재료의 불량 또는 열화
- 지진에 의한 지반의 변형 및 구조물의 손상
- 통과하중에 의한 구조물 손상

이와 같은 현상 중에 제방의 안전성과 관련하여
구조물을 따라 침투를 초래하는 가장 위험한 것은
그림 12에 나타나 있는 바와 같이 지지말뚝 기초의

경우에 융기에 의한 저판 아래의 공동발생이다. 즉,
연약지반 상에 말뚝으로 지지되는 통문에서는 주변
지반의 압밀침하가 수반되어 저판 아래에 공동이
형성되기 쉬워지며, 제체와 성토사이에 균열과 느
슨한 지역이 발생하게 된다. 또한 제방 천단에서는
단차가 형성되는 경우도 많다. 특히, 통문을 지지하
고 있는 기초파일과 통문구조물 저판 아래의 공동
이 수로가 되어 누수가 발생하는 경우에는 저판의
측방을 우회하는 물이 흠을 침식시켜 제체 측면에
서도 공동이 생기는 경우가 있다.

이러한 현상이 통문을 따라 연속되면 그림 13에
표시된 바와 같이 하천 내부에서 하천 외부로 통하는
누수통로가 형성되어 파괴에 도달하는 경우가 많다.

○ 침투에 대한 안전성 평가

그림 12 및 그림 13에 표시된 누수진행 과정도와
개념도는 구조물 주변 제방의 개착조사와 연동시험
등의 각종 조사결과를 근거로 상정되어 있어 구조물
주변 제방의 변형발생 및 이에 따르는 누수현상의 일
부를 설명한 것이다. 일반적으로 제체의 침투에 의한
안전성 평가는 매우 어려운 문제이며, 이것은 제방을
통과하는 구조물이 제체 속에 있기 때문에 눈으로 직
접 관찰이 곤란한 것도 하나의 요인이 되고 있다.

그러므로 구조물 주변 제방에 있어서는 일반제방
의 침투에 대한 안전성의 조사에서 실시한 것처럼
수리학 및 토질공학에 기인한 공학적 조사기법과
조사기준을 명확하게 하는 것은 현상태의 기술수준
으로는 곤란하기 때문에 경험에 의거한 정성적인
안전성의 평가에 따르고 있다.

제체의 침투에 의한 안전성 평가는 통문 등 구조
물의 기초제원, 설치장소의 지형 및 제방의 토질특
성, 과거의 재해를 겪은 이력, 제방의 융기 및 호안
의 변형 등의 외관상황, 구조물의 변형 및 연결부의
열림 등의 구조물내 상황으로부터 저판 주변의 공
동화의 유무를 판단하는 것이다. 또한 필요에 의해
연동시험을 실시하여 공동의 연속성과 차수판의 기
능저하 등을 평가한다. 그리고 경험이 풍부한 전문
가에 의해 상기 자료의 해석을 포함한 현지 진단을

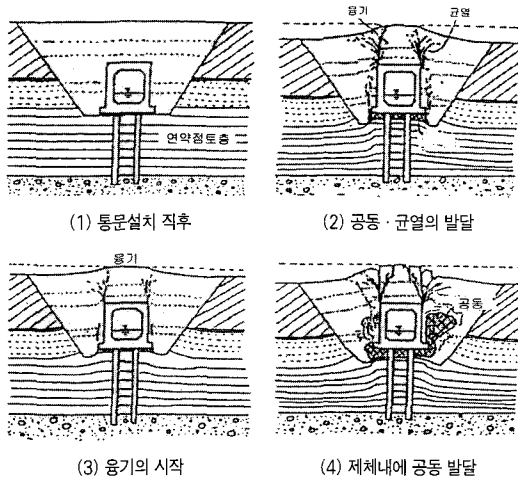


그림 12. 통문주변의 공동 및 누수진행 과정도

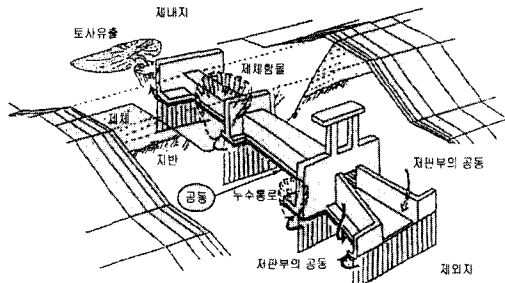


그림 13. 통문주변의 변형과 누수경로의 개념도

실시하여 그 구조물 주변 제방의 침투에 대한 안전성을 평가하고 지속적인 모니터링이 필요하다.

4.4 제체와 구조물 주변의 모니터링

1) 연통시험

구조물 등 체원조사 및 변형조사 결과로부터 구조물 주변 제방의 공동화가 예상될 경우에는 연통시험을 실시한다. 즉, 통문, 통관 등 구조물의 바로 아래에 생긴 공극의 존재 자체는 구조물의 용기 등의 변형 유무와 정도에 의해서 그 가능성을 추정할 수 있지만 공동의 연속성, 특히 차수판 사이에 두고 세굴된 2공 중에서 1공에 물을 주입하여 그 수압변동이 다른 공에 어떻게 영향을 미치는지를 판정하여 수로로서의 이상여부를 파악하는 연통시험을 시행할 필요가 있다. 연통시험은 시험공의 배치와 주수방법 또는 시험결과의 해석에 있어서 충분한 지식과 경험을 필요로 하기 때문에 실험에 있어서는 전문가의 조언을 받는 것이 필요하다.

① 연통시험의 원리

연통시험은 구조물을 따라 공동의 연속성 및 물에 의한 수압의 전달 또는 흐름이 있음을 확인하는 시험이다. 저판 혹은 저판 주변에 비어 있는 공동을 이용하여 시행한다. 즉, 구조물 주위의 지반 혹은 제체내의 침투류는 물이 토립자의 간극을 이동하기 때문에 일반적으로 극히 완만하게 움직인다. 그러나 공동이 있으면 그 구간내의 수압의 변동은 거의 동시에 일어나거나 혹은 시간지체가 없이 유동을 발생시킨다. 이와 같이 흙의 침투와 상관없이 공동을 통해 연결되는 상태를 「연통」이라고 부른다.

연통시험은 용기에 의한 공동의 존재가 있을 것으로 예상되는 구조물에 대해서 저판 혹은 저판 주변의 몇 군데를 천공한 뒤 그 1공을 주수공(물을 주입하는 구멍)으로 하고 다른 공을 「측정공」으로 하여 주수공에 주수를 할 때 그 공들의 수위변동 혹은 수압변동을 측정하여 변동량과 시간지체로부터 공동을 통한 수로의 연속성 상황을 진단하는 것이다. 그림 14는 한 쪽의 공에 압력펄스를 주었을 때 다른 공의 응답을 보는 연통시험의 한 방법이다.

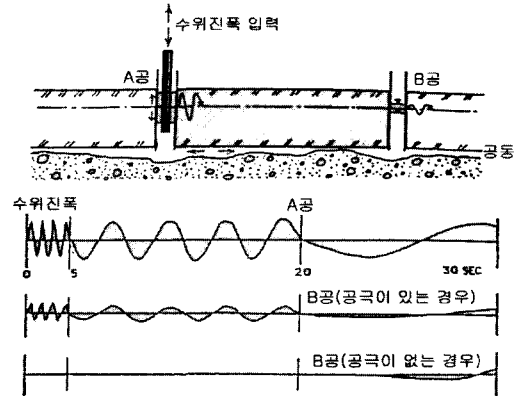


그림 14. 압력 펄스에 의한 연통 시험방법

② 연통시험의 유의사항과 순서

연통시험은 주로 차수판을 사이에 둔 수로의 연속성을 파악하는 것이므로 시험에 의해 지반을 교란시키는 것은 피해야 한다. 즉, 연통시험에 있어서 상시 수위보다 1m 이내 정도의 수압을 작용시켰을 때 차수판을 사이에 둔 수로의 연속성 및 그 외의 구간에서의 수로의 연속성을 파악하는 것이 가능하다. 시험에서 작용시키는 수압을 상시수위보다 1m 이내로 하는 것은 근접한 공 사이가 주변에 비해 특별하게 큰 수압을 국소적으로 부여하면 그 주변에 지반의 침투 파괴와 침식을 일으킬 우려가 있기 때문이다. 즉, 시험에 의해 지반을 교란하지 않도록 주의할 필요가 있다.

시험공의 배치는 그림 15에 표시된 것처럼 기설된 차수판 사이에 두고 배치되어 있다. 그림 15에 대한 시험결과의 예는 그림 16에 나타난 바와 같이 그림 16에는 No.2공에 주수했을 때 다른 공의 응답을 표시한 것이다. 여기서 시판을 사이에 둔 No.2공과 No.3공의 사이에 부분적인 연통성이 있어 No.3, No.4, No.5의 각 공은 거의 동일한 움직임을 보인다는 것을 알 수 있다.

하천 제외지에 계획홍수위 정도의 수압을 작용시켜 실제로 홍수에 가까운 상태로 만드는 일도 고려해 볼 수 있지만 그 경우에는 공동의 상황, 작용하는 동수구배 등을 충분히 검토한 후에 실시의 가부를 결정하는 것이 필요하다.

제체의 상부에서부터 보링하여 설치한 공은 원칙적으로는 그라우트 등으로 충분히 충전시킨다. 모니

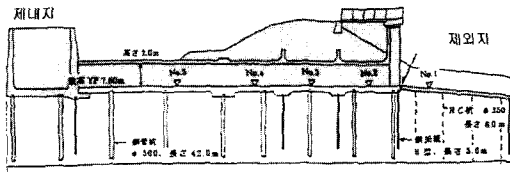


그림 15. 연통시험공 배치 예

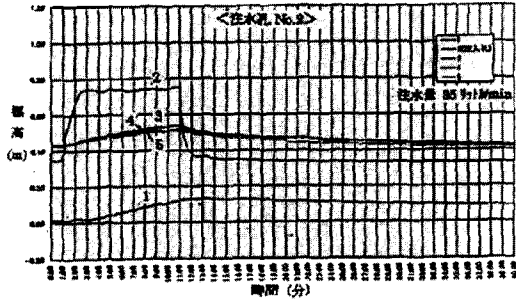


그림 16. 연통시험결과 예

터 공으로 계기를 설치한 경우는 간극수압계를 사용하여 수압계 상부의 공간은 그라우트 등으로 완전히 충전시킨다. 하천의 홍수시에 공동내의 수압은 하천수와 같은 정도의 높이가 되는 경우가 있으므로 특히 제내지 측의 낮은 위치, 제외지의 소단보다 아래, 비탈면 끝부분의 보링공은 해방상태가 되어선 안 된다.

2) 저판 그라우트공을 활용한 조사

이미 그라우트용의 공을 설치한 구조물에서는 그 덮개를 열고 저판 아래의 공동의 상황을 확인하는 것이 가능하다.

저판아래의 그라우트공을 활용한 조사는 비교적 간편하며, 저판아래의 공동상황을 직접적으로 확인할 수가 있기 때문에 적극적으로 활용할 만한 방법이다. 또한 그라우트 공이 설치되어 있지 않은 경우라도 전술한 연통시험공을 이용하여 동일한 방법으로 관찰을 할 수가 있다.

3) 비파괴시험

구조물 주변 제방의 변형조사에서 비파괴시험이 적용되고 있으며, 대표적인 방법으로서 고밀도 전기탐사, 지하 레이더 탐사, 마이크로 중력탐사가 있다.

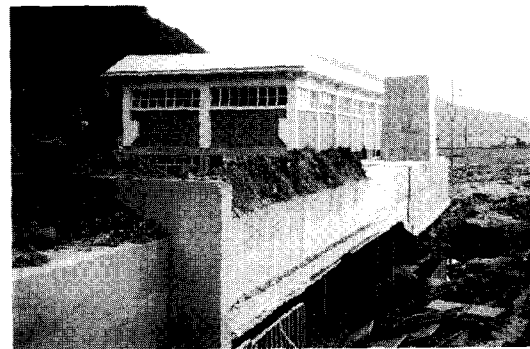
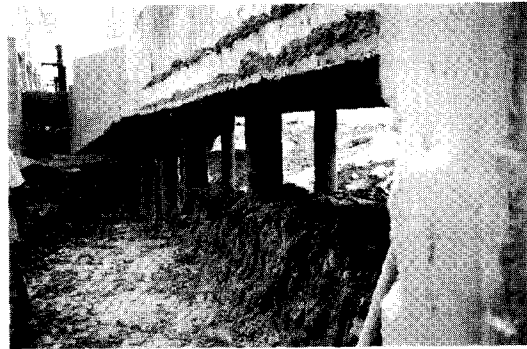


사진 ①, ② 제체 주변의 구조물 하단부 파이핑 사례

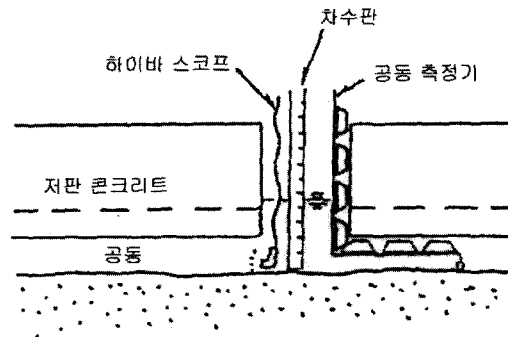


그림 17. 저판 아래의 공동 관찰방법의 예

이들 방법은 현재 상태의 정성적인 결과가 얻어질 뿐만 아니라, 특히 저판아래의 공동에 대해서는 콘크리트내 철근의 간격이 좁아서 이중으로 배치되어 있는 경우 검출에 한계가 있다.

4) 개착조사

개착조사는 구조물의 개축과 철거 시에 행하는

것으로서 구조물 저면으로부터 1m정도 아래까지 관찰하여 구조물의 변형, 기초의 상황, 저판아래의 공동의 확장 등을 직접적으로 파악하는 것이 가능하며, 변형조사로서 유효한 방법이다.

5. 낙동강 연안제 주변시설물의 보강대책

5.1 제체의 차수 및 보강공법

차수 공법은 크게 토립자 사이의 간극을 메워 지반을 고결 또는 경화시키는 약액주입공법과 지반내 말뚝 또는 벽체를 형성하여 차수 및 보강 효과를 기대할 수 있는 구조물에 의한 공법 그리고 시멘트·석회석을 주된 화학적 안정재를 원지반에 투입·혼합하여 지반을 개량하는 심층혼합처리공법 등으로 분류할 수 있다.

약액주입공법과 고압분사주입공법은 일시 국부적 누수 현상에는 대처가 가능하나 장기적인 제방의 안전을 도모할 수 없다. 또한 구조물에 의한 공법으로 명명되는 공법 역시 부식에 관한 문제와 더불어 이질재료와 그 제체구성 물질간의 완전한 결합에 관한 회의적 시각이 많은 것이 사실이다.

심층혼합처리공법은 연약지반 상부에 설치하는 구조물의 기초지반 개량으로 이용되는 것이 가장 일반적인 용도이며, 이 외에도 제방의 파이핑 방지와

지하수의 수평이동 차단용 연직 차수벽, 지하 터파기 공사시 붕괴 방지용 토류벽 등 굴착시의 지반의 안정성 확보와 같은 용도로 사용할 수 있다. 또한 Top-Down공법 사용시 재료의 종류를 변경하거나 투입량을 조절하여 고강도 토류벽을 설치할 수 있어 H-Beam과 같은 별도의 강제 보강이 없이 토류 벽체의 붕괴를 방지할 수 있으며, 동시에 지하수의 이동을 효과적으로 차단할 수 있는 공법이라고 판단된다.

5.2 제체 및 지반 누수대책

근본적으로 제방붕괴의 원인이 되는 제체 및 기초지반의 파이핑 현상을 억제시키기 위한 방안에 대한 검토가 선행되어야 한다. 파이핑 현상을 억제하기 위한 방법들은 누수의 원인, 제체누수, 기초지반 누수 또는 복합된 누수라는 3가지 원인을 기초로 보강대책을 결정하게 된다. 이에 따라 제방의 누수 원인별 보강방법들은 다음과 같다.

1) 제체누수의 대책

① 제체단면의 보강

제방의 저폭을 확대하여 침윤선이 제체비탈면에 노출되지 않도록 하는 공법으로서 제내측 비탈면에 소단형식으로 제방과 동일한 재료를 이용하여 시공하거나, 계획홍수량에 대한 소요단면이 부족한 제

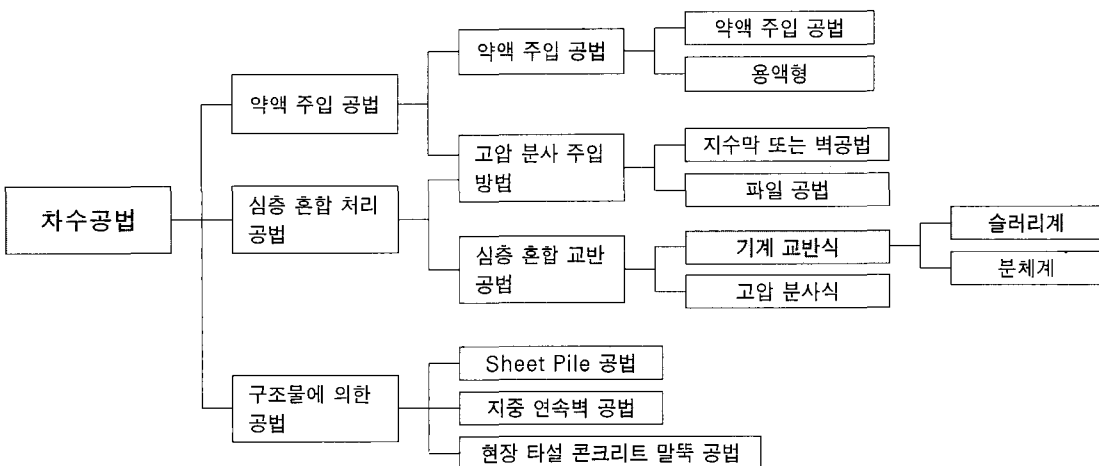


그림 18. 차수·보강 공법의 비교

방은 하천설계기준에 의거한 필요단면을 보강하여 침윤선이 제내지 비탈면 내로 유도되도록 하는 방안이 있다. 그러나 계획 및 시공은 용이하나 별도로 제내지의 토지가 타용도로 이용되고 있을 경우 보상 및 협의에 많은 노력과 시간이 필요하다.

② 차수벽 시공

제체 중간에 침윤선을 차단할 수 있는 코어(core)를 형성하는 개념으로 차수벽을 시공하여 유로형성을 적극적인 방법으로 억제하게 하는 방법으로서 경제적이며, 시공성과가 우수하다. 차수벽공법으로는 약액주입공법, 심층혼합처리공법, Sheet Pile, 기타 여러 가지의 연직차수벽 시공방법이 있다.

③ 제외측 비탈면의 복공시공

제외측 비탈면에 침투를 억제할 수 있는 콘크리트 블록, 차수쉬트 및 매트 등을 설치하여 제방안정을 도모하는 공법이다.

④ 제내 비탈선단의 시공

누수예방의 제내비탈면에 돌쌓기 등의 투수성이 강한 재료를 시공하여 침윤선을 떨어뜨리고 제체내 간극수를 신속히 제체외로 배출시켜 비탈면을 보호하는 공법이다.

2) 지반누수의 대책

① 침투수 차단을 위한 차수벽 시공

침투수로를 차단 또는 침투로의 길이를 길게 함으로써 동수경사를 완만하게 하도록 하는 공법으로서 기초부에 차수벽을 설치한다. 차수벽의 심도는 불투수층이 얇을 경우에는 불투수층에 도달하도록 하지만, 심도가 깊을 경우에는 침투수의 동수경사가 허용안전율을 확보할 수 있는 깊이로 한다.

② 침투압에 상응하는 제내지 압성토 공법

제내 제방에 연하여 압성토를 시켜 침투압에 대응하게 함으로써 파이핑작용을 억제시키고, 압성토의 폭 및 두께는 침투류 해석에서 정해진다.

③ Drain공법

제내지반의 투수층 상부가 농경지 등으로 덮여 있을 경우 Drain공을 설치하여 침투압을 소산시키는 공법으로 압성토 공법과 병행시 효과를 크게 볼 수가 있다.

제체 누수는 제방에 치명적인 손상을 가져올 수 있으므로 그 제방의 형상, 면적 및 누수량 등을 상세히 조사해야 한다. 누수가 발견될 경우(특히 혼탁수가 유출될 경우) 즉시 관리 주체자에게 통보하여

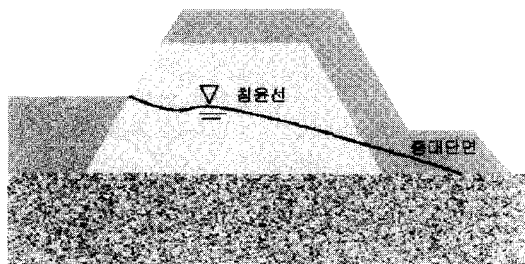


그림 19. 제체단면 보강

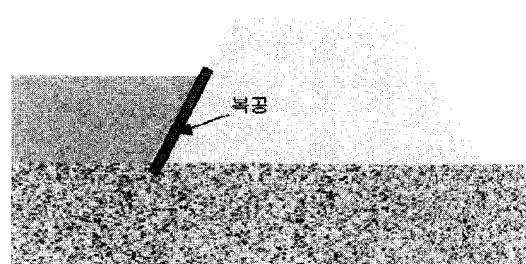


그림 20. 제외측 비탈면의 복공시공 예

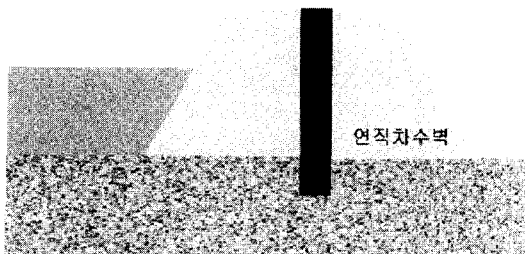


그림 21. 연직차수벽 시공 예

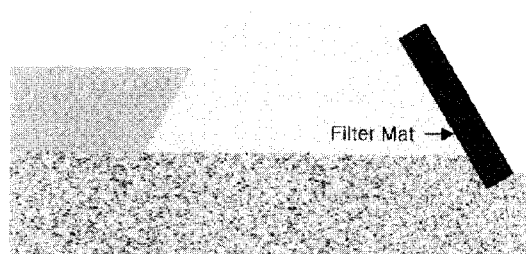


그림 22. 제내측 비탈선단의 시공 예

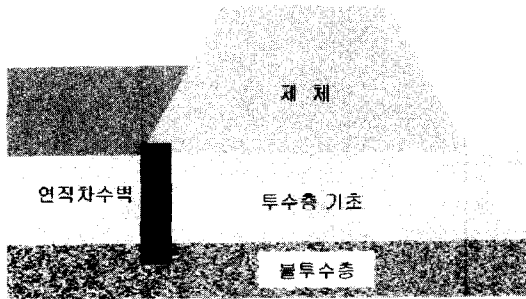


그림 23. 침투차단 차수벽 시공 예

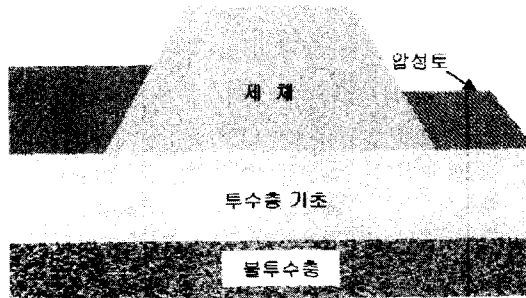


그림 24. 침투압 대응 제내지측 압성토 시공 예

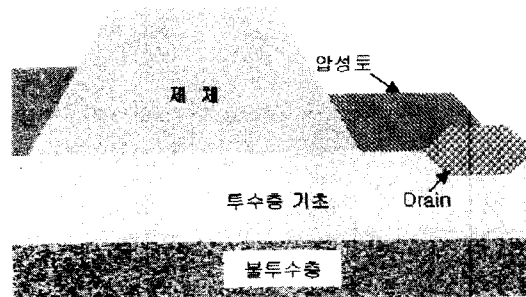


그림 25. Drain 공법 예

정밀 안전진단의 필요성 여부를 판단하도록 해야 한다. 홍수기에는 제내지 비탈면의 국부세굴이나 지반붕괴 현상과 아울러 파이핑 현상 유무를 확인하여야 하며, 갈수기에는 그 흔적 확인과 동시에 탐문조사를 시행하여 취약단면의 독마루푹, 비탈경사와 제방저쪽을 확인하여 침윤선 검토시 자료로 사용한다. 또한 제방의 누수 요인을 파악하기 위하여 청문조사를 실시하고, 제방파손의 주원인인 배수구 등 하천구조물과 각종 관의 제방 횡단현황을 사전

에 숙지해야 하며, 날개벽의 호안 연결부 및 암거부가 제체와 접하는 부분 등의 누수, 세굴, 공동현상을 파악해야 한다. 두더쥐, 들쥐 등 야생동물의 구멍과 제방 관통구조물의 표면과 제체 사이의 공극은 제체 안전과 누수파괴의 원인이 되므로 지장물 탐사장비를 사용하여 점검한다.

제방 침하는 장기간에 걸쳐 일어나는 경우가 많으므로 단기간의 점검을 통해서서는 확인이 어렵지만, 제내지 측방의 흙의 부풀어오름으로 간이 판별하도록 해야 한다. 이와 같이 다양한 보강방법들이 있으며, 각 보강방법 중에서 공법의 채택시에는 다음 사항이 충분히 검토되어야 한다.

연직차수벽은 제체의 중심부에 일정한 두께로 불투성 벽체를 조성하여 유선망 형성을 차단함으로써 유속감소, 유로차단의 효과로 보일링 및 파이핑 현상을 막게 되고 궁극적으로 제방의 안전을 도모하며, 제체 내부에 연속 불투수성 벽체 또는 저 투수성 콘크리트 벽체를 조성하는 것과 동일한 효과를 촉진할 수 있어 타 공법에 비해 제방의 안전율이 증대된다.

6. 결론

지금까지 낙동강 치수방재와 관련하여 낙동강 유역권의 수계와 수문특성을 고찰하고 치수방재 현황을 조사하여 보았으며, 특히 연안제 주변의 시설물인 수로박스, 통관, 통문 등의 불연속면에서 발생해 왔던 파이핑 현상을 대상으로 제체의 파괴 메카니즘과 안전관리를 위한 모니터링 방법을 소개하고 낙동강 연안제 주변 시설물의 보강대책을 제시하였다.

- 1) 낙동강 유역의 항구적인 치수방재 기본방향은 하도의 정비와 유역의 저류기능 확보방안을 병행해야 한다. 즉, 하도의 대대적인 정비와 제체의 보강이 성행되면서 유역 상류부에 홍수조절용 저수지를 건설함으로써 제체의 홍수소통부담을 경감시켜 주어야 한다.
- 2) 낙동강 연안제 주변이 불연속면이 형성되는 시설물 부근에서는 설계 및 시공상의 완벽한 기준을 적용해야 한다. 특히, 시설물 설계에서는

파이핑의 원인이 되고 있는 유수의 통로를 차단하기 위한 지수벽 설치 그리고 암거구조물 지지부의 다짐처리 등의 엄격한 시공관리가 필요하다.

- 3) 기존 제체 주변의 시설물에 대해서는 공동현상 또 구조물의 변형 등에 대한 정기적인 감시와 진단이 실시되고 연통시험이나 감시카메라 등에 의해서 관리하고 그 이력사항을 전산 관리 되도록 해야 한다.
- 4) 하천시설물의 설계에 있어서 최근에 홍수규모가 증가하고 하천주변의 경제적 가치가 늘어나고 있는 점을 고려하여 하천시설기준을 강화해야 하며, 하천공사와 공법에 있어서도 시공장비의 현대화, 경제력 증대 등에 따른 시공기준을 강화시키고 최신공법을 도입함으로써 제체의 축조기준과 등급을 강화해야 할 것이다.

따라서 국가의 예산을 편성하고 다루는 관계부처는 물론이고 특히, 정치인들의 줄대기식 예산확보 활동은 결과적으로 균형적인 국가예산을 왜곡시키는 원인을 제공하게 되었다. 그러므로 도로에 비해

등한시되고 있는 하천치수 사업에 국가적인 관심을 갖고 보다 많은 예산을 지원해야 할 필요성이 바로 여기에 있다. 이제는 하천 유지관리 비용을 현실화하여 정기적인 제방보수가 이루어져야 한다. 현재 유지보수와 건설 등이 지자체와 국토관리청으로 이원화되어 있어 예산부족에 허덕이는 지자체가 관심을 갖고 유지 관리할 것을 기대하기는 어렵다.

하천 유지관리 비용을 현실화하고 관리인력을 충분히 확보하여, 홍수위험을 사전에 예방하고 정기적인 제방보수도 이뤄져야 한다. 계획홍수량에 따라 일률적으로 적용하고 있는 제방단면 설계기준도 낙동강유역의 특성이 반영되도록 변경되어야 한다. 즉, 홍수지체시간과 강우에 의한 제방의 연약화, 제내외의 수위차 등을 고려해 설계할 수 있도록 설계기준과 공사표준시방서를 과감하게 개정해야 한다. 배수펌프장 등 하천구조물 주변에서 매년 홍수시마다 반복되는 크고 작은 피해를 방지하기 위해서 구조물설치 기준을 근본적으로 수립해야 할 것으로 판단된다. ●

〈 참고문헌 〉

- 1) 삼목, 등정, 야구, 좌좌목 : 통문, 통관구조물주변에서 생기는 공동의 대책공법에 관한 검토, 제 34회 지방공학연구발표회, 1999
- 2) 중산, 옹곡, 장뇌, 등산 : 통문주변제방의 누수위험도 조사에의 연통시험법의 적용 예, 제34회 지방공학연구발표회, 1999
- 3) (재)국토개발기술연구센터편 : 유구조 통문설계의 안내, 산해당, 1998
- 4) 한국수자원공사 : 전국하천조사서, 1992
- 5) 건설교통부 : 낙동강 하천정비기본계획(보완2) 보고서, 1992
- 6) 건설교통부 : 낙동강 하천정비기본계획보고서, 1993
- 7) 건설교통부 : 낙동강 하천정비기본계획(보완3) 보고서, 1993
- 8) 건설교통부 : 하천공사표준시방서, 1994
- 9) 건설교통부 : 하천시설기준, 2000
- 10) 한건연, 지흥기, 김 승, 김 원 : 낙동강 봉산제 피해원인 조사 및 항구대책 수립, 한국수자원학회 · 한국건설기술연구원, 2000
- 11) 한국수자원공사 : 2002년 홍수피해 종합조사보고서, 2002
- 12) (주)동해 : 하천제방 Piping 현상 방지를 위한 연직 차수벽 설치공법, 2002
- 13) 지흥기 : 낙동강 연안제 현황과 향후 정비방안, 제 2회 방재기술세미나, 한국방재협회, 2002