

응력-침투 연계 해석에 의한 필 댐의 최적 설계

박춘식¹⁾, Chun-Sik Park, 이준석²⁾, Jun-Suk, Lee, 김종환³⁾, Jong-Hwan Kim

¹⁾ 창원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon University

²⁾ 창원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Changwon University

³⁾ 창원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Changwon University

SYNOPSIS : This thesis has been researched on optimized design method for the total cross section of embankment considering the fact that the size of embankment cross section is directly related with economic efficiency when dam designing. In general, embankment cross section of fill dam is either determined by cohesion and angle of internal friction, a strength parameter of embankment materials or by permeability of embankment. Therefore the size of embankment cross section depending on strength parameter of embankment materials was determined by using MIDAS-GTS program through stress-seepage coupled analysis at the time of fill dam design.

As a result, determination of embankment cross section was more affected by the size of central core and permeability rather than by slope stability by shear strength and it was revealed that in case of embankment height being over 20m, stability against infiltration and slope action could be secured only when embankment slope is at least over 1:2.5. In addition, it was also revealed that in case of making the size of central core exceeding specification standard, total cross section of embankment could be reduced considerably and at the time of embankment design, adequate size and appropriateness of embankment cross section could be determined with referring the table suggested by this study.

Keywords : optimized design method, total cross section of embankment, cohesion and angle of internal friction, strength parameter of embankment materials, stress-seepage coupled analysis

1. 연구 배경 및 목적

최근 기상이변에 따른 집중호우나 가뭄으로 인한 피해가 속출되는 가운데 우리나라는 물 부족 국가로 지정되면서 수자원 관리에 대한 중요성이 대두되고 있다. 이에 따라 현재 전국 곳곳에서 하천 정비나 보, 또는 댐의 축조가 이루어지고 있는 실정이다.

우리나라의 강수량은 연평균 약 1300mm로서 풍부하나 연도별, 계절별, 지역별 강우차와 급한 유역경사로 인해 물의 효율적인 관리가 필요하며, 이러한 불리한 조건 극복하여 하천을 다스리고 수자원을 이용하기 위해 댐을 비롯한 제방을 안정적으로 계획하고 관리할 필요가 있다.

댐은 수자원의 이용측면에서 매우 유용한 수단이나, 대형화됨에 따라 붕괴 및 손상에 따른 위험은 훨씬 더 증가하게 되었다. 이러한 필댐의 파괴는 막대한 피해와 재산의 손실로 이어지기 때문에 계획부터 시공, 유지에 이르기까지 안정성을 고려한 철저한 관리가 필요하다.

댐의 파괴원인에 대해서 그 동안 많은 학자들이 세계 각국에서 수집한 자료를 바탕으로 통계적인 분석을 시도해왔다. Biswas와 Chatterjee(1971)는 세계 전역의 댐 및 제방에 관한 자료를 300개 이상 수집하였으며 그 중 35%가 여수로 통수능(carrying capacity)을 초과한 홍수로 인해 파괴되었고, 25%는 침투(seepage), 파이핑 현상(piping), 과잉간극수압(excessive pore pressure), 부적절한 절토, 침하활동 등

의 기초부 문제로 인해서 파괴되었으며, 나머지 40%는 부실시공 및 불량재료, 전쟁 등이 원인이었다고 한다. 위와 같은 원인뿐만 아니라 근래 계속되는 이상기후로 인해 계획이상의 홍수가 발생하거나 극심한 가뭄과 급격한 농업용수량의 증가로 인한 제방의 수위 저하가 파괴의 원인이 되고 있다.

따라서, 본 연구는 유한요소해석 프로그램을 이용하여 제체의 안정성에 가장 영향을 미치는 침투 및 사면 활동에 대해 응력-침투 연계해석(coupled analysis)을 실시하여 경제적이고 안정적인 제체 단면의 설계기준을 제시하는데 목적이 있다.

2. 해석 방법

댐 설계 시 제체 단면의 설계 기준이 명확하지 않고 경험적인 이론을 바탕으로 사면의 구배가 결정되고 있어 이에 대한 검토가 필요하다.

기존의 존형 댐 설계 사례를 보면 주로 안정성에 기초를 둔 설계로 제체의 크기가 비경제적으로 크게 설계된 경우를 종종 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 안정성 뿐만 아니라 경제성을 고려한 제체 단면의 설계를 유한 요소법을 적용하여 최적단면을 결정하고자 한다.

2.1 전단강도에 의한 제체 사면의 결정

2.1.1 강도 정수 산정

표 1은 제체 단면 결정시 사용될 강도 정수를 나타낸 것이다. 강도 정수 산정 시 일반적으로 사용되는 제체의 강도를 사용하였으며, 투수계수의 경우 설계기준의 최소값을 적용하여 최대한 안전측으로 단면이 결정 될 수 있도록 하였다.

표 1. 해석 단면에 대한 강도 정수

구분		Case.1	Case.2
투수층	C (t/m ²)	2.0	3.0
	ϕ (°)	30	35
	k (cm/sec)	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³
불투수층	C (t/m ²)	1.0	1.0
	ϕ (°)	20	20
	k (cm/sec)	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵

2.1.2 제체 단면의 결정

그림 1~4는 유한요소 해석 시 해석 방법에 대하여 나타낸 것이다.

표 1에서 제시한 재료의 강도정수를 이용하여 제체 높이 H=20, 25, 30, 35, 40, 50m에 대하여 임의의 사면 경사로 제체 단면을 모델링 한 뒤, 사면 안전율 F.S=1.5에 해당하는 사면 경사를 결정하였다.

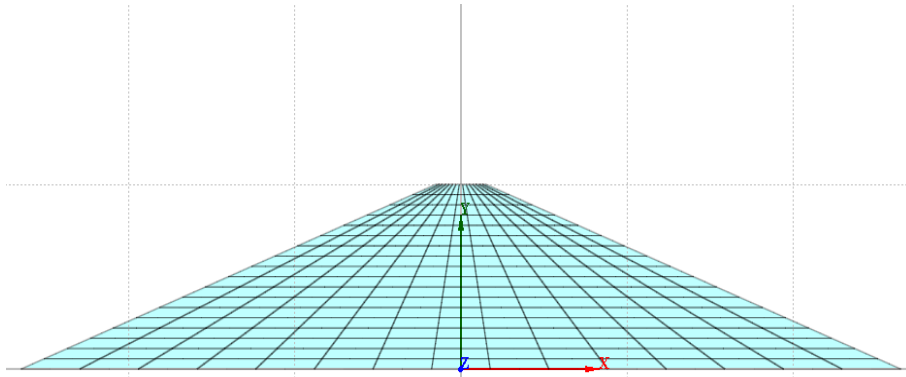


그림 1. 제체 단면 모델링

해석 단면에 주어진 경계 조건에는 만수위에 해당되는 좌측수위와 제체 하류부 비탈면 끝에 토 드레인(toe drain)에 해당되는 우측수위, 사면 안정 해석 시 필요한 지반경계조건, 원호 파괴면 설정 조건 및 만수위시 수압 조건이 있다.

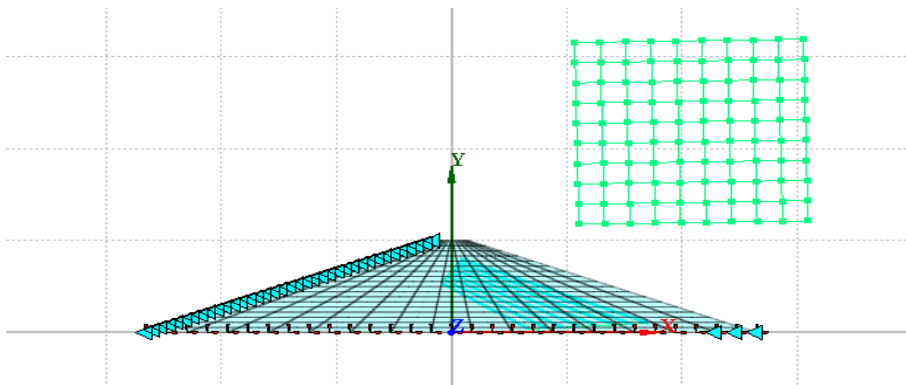


그림 2. 경계 조건 설정

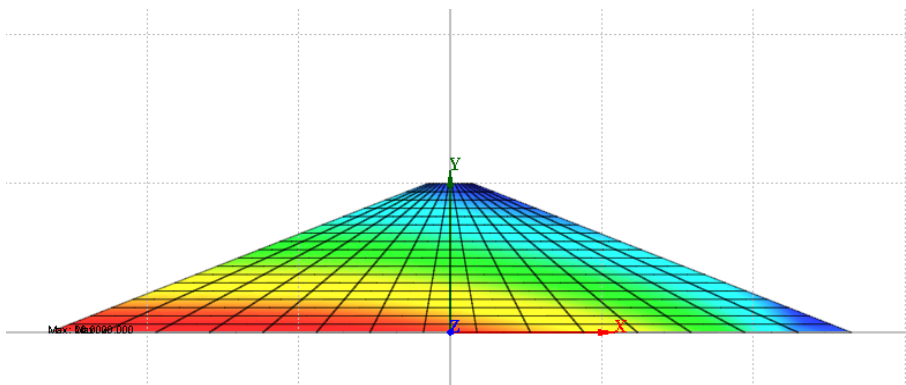


그림 3. 침투류 해석 결과 (간극수압 결정)

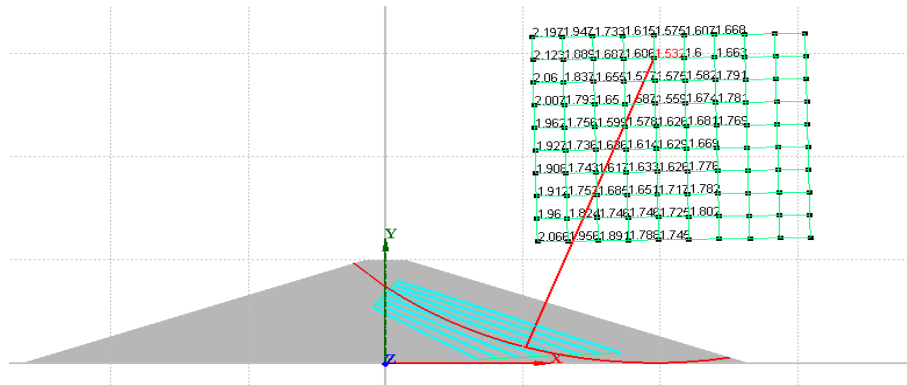


그림 4. 사면 안정 해석

2.2 core(중심 차수존)크기에 의한 제체 단면의 결정

2.2.1 core의 설계 방법

준형 댐에서의 중심 차수존에 해당 되는 core는 제체의 침투에 가장 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에 재료의 선정부터 시공 방법에 이르기까지 상당히 중요하게 관리되어야 하는 부분이다.

그림 4.5는 core의 설계 기준에 대해 나타낸 것으로 core의 상단 폭은 댐의 높이 30m 기준으로, 그 이하의 제체의 높이에 대해서는 1.5~3.0m, 그 이상일 때 2.5~4.0m를 취하되 설계 홍수량을 기준으로 최소 2.0m 이상이 되도록 정해져있다.

core의 두께는 필 댐이 어떠한 나쁜 조건에서도 안전하기 위해서 토질이나 댐의 높이에 관계없이 수압의 30~50%정도의 두께를 가져야 하고, 부득이하게 그보다 얇게 시공되는 경우 주의 깊은 설계 및 시공이 필요하다. 그 외 수압의 10% 이하의 두께는 누수로 인한 제체의 결괴가 없는 특수조건을 제외하곤 시공되어져선 안된다.

core의 사면 경사는 core의 전체적을 결정하는 중요한 요소로 core가 차수존으로서의 역할을 다할수 있도록 계획되어야 한다. 하지만 core의 크기가 너무 커지면 건설 중에 발생하는 간극수압 소산이 어려워지고, 제체 전체에 전단강도가 적은 재료의 차지 비율이 높아져서 전체적이 커지게 된다. 따라서, 제체 전체의 안정성에 미치는 영향을 고려하여 core 크기가 너무 커지지 않는 조건에서 설계되어야 한다. 일반적으로 core의 사면 경사는 $S=1 : 0.10 \sim 0.15$ 로 core의 직립을 피하도록 되어있다.

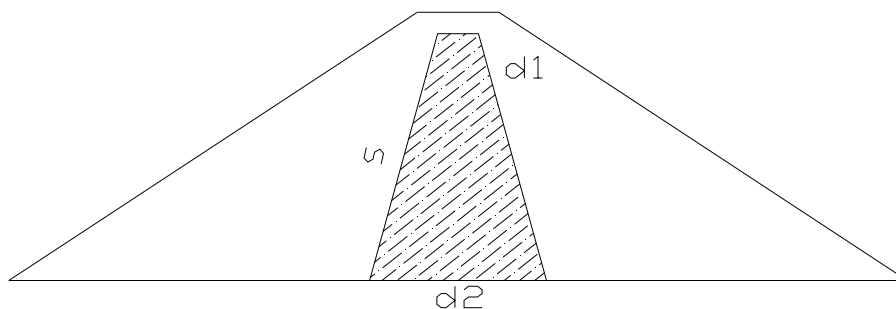


그림 5. 중심 차수존의 설계

2.2.2 제체 단면의 결정

core의 크기는 경제적인 제체 단면을 결정하는데 가장 중요한 요소이다. 따라서, core의 상단 너비를 결정할 후 core의 최대 사면 구배인 $1 : 0.15$ 기준으로 제체 단면의 크기를 결정하였다.

표 1에서 제시한 재료의 강도정수를 이용하여 제체 높이 $H=20, 25, 30, 35, 40, 50m$ 에 대해 Case. 1의

경우, core의 크기를 $d1=2.0m$, $S= 1 : 0.15$ 를 기준으로 이에 대한 제체 사면 경사를 결정하였다. 또한, Case. 2의 경우 $d1=3.0m$, $S= 1 : 0.15$ 를 기준으로 제체의 사면 경사를 결정하였다.

그림 5~10은 core크기에 기준을 둔 제체 단면의 결정에 대한 해석 순서를 나타낸 것으로 가정된 크기의 core와 제체에 대하여 Mesh를 생성하고, 침투 해석을 위한 좌·우측에 해당되는 수두를 입력한다.

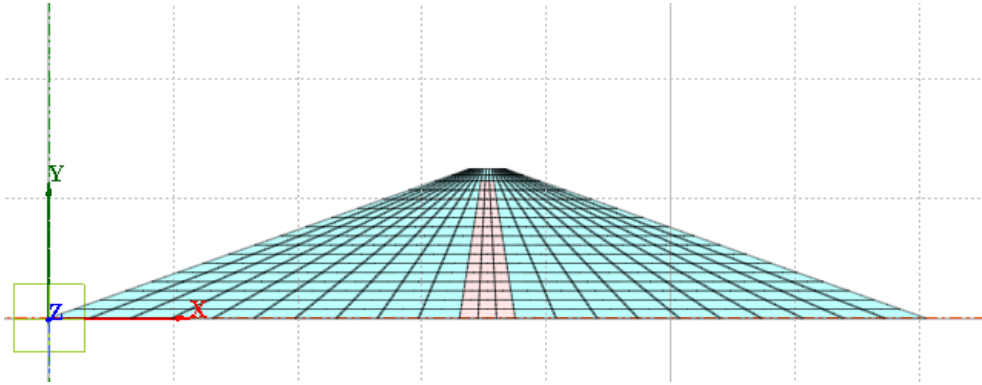


그림 5. core와 제체의 Mesh 형성

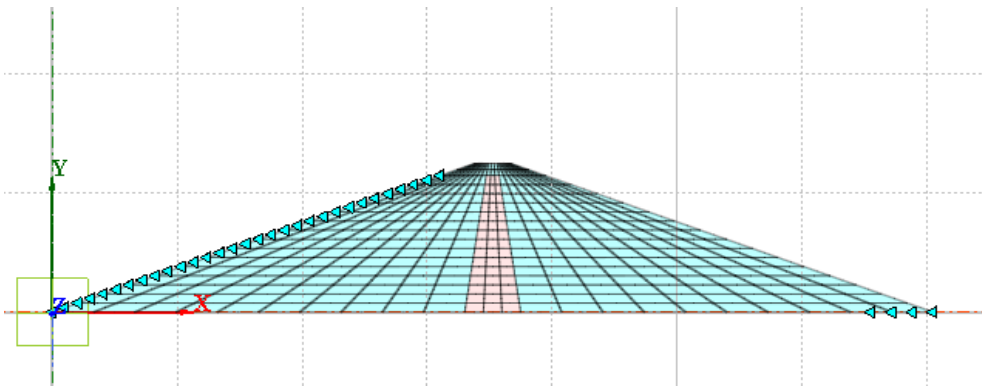


그림 6. 좌·우측 수두조건 입력

입력한 조건에 따라 침투해석을 실시하고, 간극수압과 간극수압에 따른 침윤선을 확인할 수 있다(그림 7). 그리고 산출된 동수경사가 허용한계동수경사의 만족여부를 결정(그림 8)하고 사면 안정 해석 시 좌측 수위에 대한 수압과 원호파괴 형상에 대한 경계조건을 입력한다(그림 9).

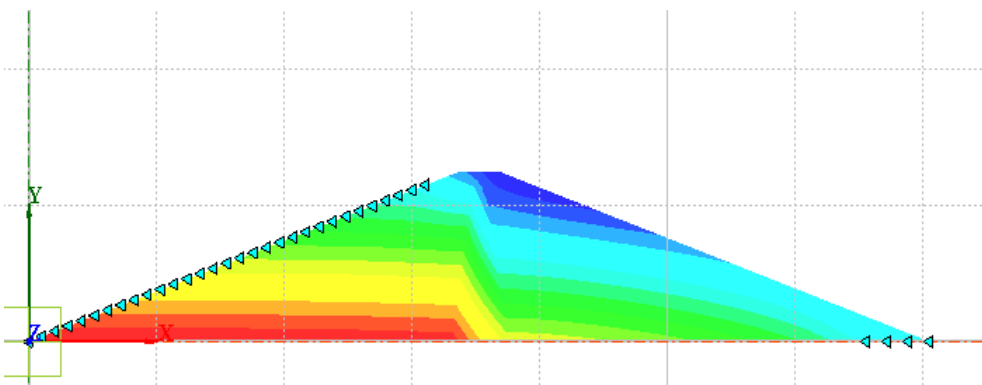


그림 7. 간극수압의 확인(침윤선 형성)

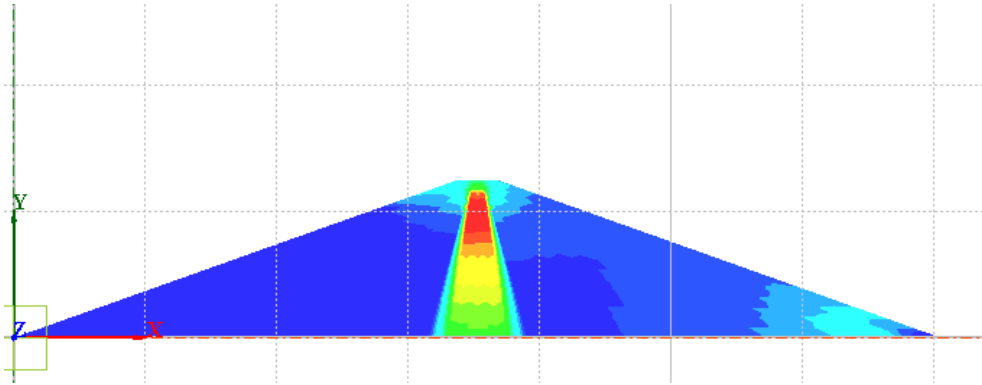


그림 8. 동수경사 결과 확인

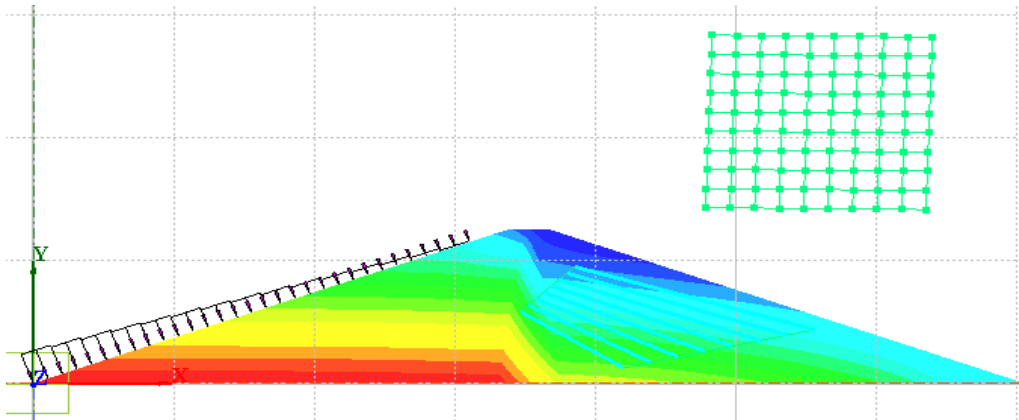


그림 9. 사면안정해석을 위한 경계조건 입력

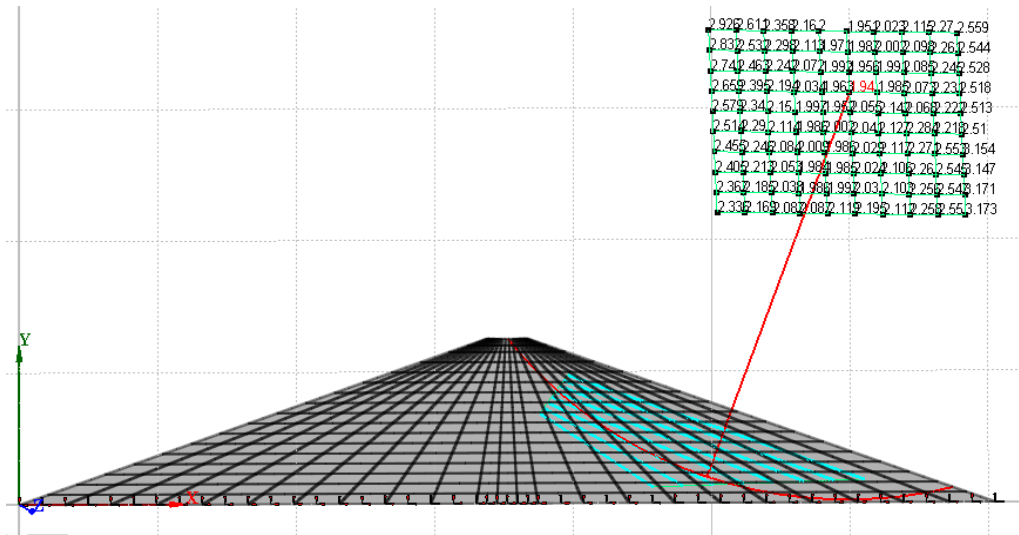


그림 10. 사면안정 해석 결과

3. 해석 결과

core크기 산정시 가장 일반적으로 사용되는 core의 상단 폭을 2.0m와 3.0m로 가정하였고, core 크기에 따라서 침투수가 얼마나 효과적으로 차단되는냐에 따라서 제체 단면의 크기 결정에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제체 단면 설계 시 core의 크기를 설계 기준 내에서 최대크기로 한다면 제

체 전단면적을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
 표 2와 표 3은 해석결과를 정리해 놓은 것이다.

표 2. 강도정수에 의한 체체단면의 산정 결과

구 분	체체높이 (m)	사면구배	사면 활동 F.S
Case.1	20	1:2.5	1.53
	25	1:2.8	1.51
	30	1:3.0	1.53
	35	1:3.1	1.50
	40	1:3.3	1.53
	50	1:3.5	1.52
Case.2	20	1:1.5	1.55
	25	1:1.8	1.52
	30	1:2.0	1.51
	35	1:2.1	1.50
	40	1:2.3	1.53
	50	1:2.5	1.50

표 3. core의 크기에 따른 체체 단면 산정 결과

구 분	체체높이 H(m)	core 상단폭 d ₁ (m)	체체 사면구배	동수경사	만족여부
Case.1	20	2.0	1:2.5	0.50	OK
	25		1:2.7	0.49	OK
	30		1:2.7	0.50	OK
	35		1:2.8	0.48	OK
	40		1:2.8	0.49	OK
	50		1:2.9	0.49	OK
Case.2	20	3.0	1:2.5	0.49	OK
	25		1:2.5	0.50	OK
	30		1:2.6	0.49	OK
	35		1:2.6	0.50	OK
	40		1:2.7	0.49	OK
	50		1:2.7	0.50	OK

체체 재료의 전단 강도는 체체 사면 활동에 중요한 요소이다. 하지만, 체체 단면 설계 시 사면 경사는 전단 강도에 의한 영향보다 침투 해석에 의해 더욱 영향을 받는 것으로 나타났다. 예를 들어, 30m의 체체 시공 시 체체의 전단 강도에 의해 결정되는 사면구배는 1:2.0으로, 사면에 대한 안전율 1.2를 만족하지만, 1:2.0 구배의 사면을 지닌 체체에는 core를 시공한다 하더라도 30m의 체체에 발생하는 침투에 대해선 체체 단면이 너무 협소하여 불안정하다는 것을 표 2과 표 3을 비교해 보면 알 수 있다.

다음 표 4는 체체의 최적 설계 단면에 대하여 나타낸 것이다.

표 4. 제체 단면의 최적 설계 결과

구 분	제체높이 H(m)	core 상단폭 d ₁ (m)	제체 사면구배	동수경사
Case.1	20	2.0	1:2.5	0.50
	25		1:2.7	0.49
	30		1:2.7	0.50
	35		1:2.8	0.48
	40		1:2.8	0.49
	50		1:2.9	0.49
Case.2	20	3.0	1:2.5	0.49
	25		1:2.5	0.50
	30		1:2.6	0.49
	35		1:2.6	0.50
	40		1:2.7	0.49
	50		1:2.7	0.50

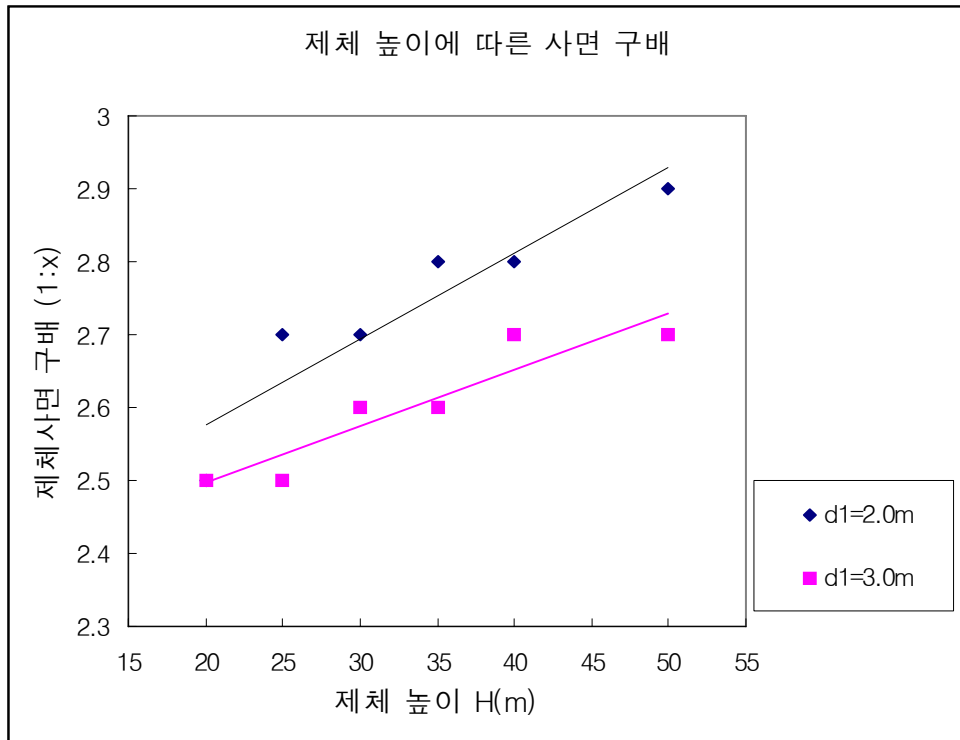


그림 11. 제체 높이에 따른 사면구배

그림 11은 제체의 높이에 따른 사면 구배 산정 결과를 그래프로 나타낸 것으로 중심 core의 크기가 작을수록 제체 높이에 따라서 사면 경사가 더욱 급하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 11에서 d1=2.0m에 해당하는 그래프는 설계상 가장 불리한 값을 적용하여 산정된 결과로 댐 시공 시 제체의 강결한 다짐이나 core 부분에 대하여 차수효과가 큰 재료를 사용 시 해당되는 제체 단면의 사면 경사는 d1=2.0m 그래프 아래에 존재 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문은 댐 설계 시 제체의 단면적의 크기가 경제성과 직결된다는 점을 고려하여 제체 전단면적의 최적 설계 방법에 대해 연구하였다. 해석시 유한요소해석(MIDAS/GTS)방법을 이용하여 제체 재료의 전단강도에 의한 제체 사면의 결정 방법과 중앙 차수준인, core의 크기에 따른 제체 사면의 결정 방법을 비교하여 최적 설계 방법을 제시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 댐의 제체 단면의 결정은 제체 재료의 전단강도에 의한 사면 안정성보다 core의 크기 및 투수계수에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에서 제시된 재료의 성질을 이용할 경우 H=20m가 넘는 댐 설계 시 제체 경사는 최소 1:2.5 이상 되어야 침투 및 사면 활동에 대한 안정성을 확보할 수 있다.
- (3) 제체 설계 시 제체 활동에 대한 기준을 만족하는 범위에서 중앙 차수준의 크기를 지방서 기준 이상으로 크게 할 경우 제체 전단면적을 상당히 줄일 수 있다.
- (4) 본 연구에서는 core의 크기에 의해 제체 사면 경사의 결정 결과로 차후 더 높은 제체의 높이나 다른 강도 정수 등의 다양한 조건에서 해석 해 볼 필요가 있다.

참고문헌

1. 김기계(2002), “콘크리트 표면차수벽형 록필댐의 거동특성에 관한 연구”, 충남대학교 토목공학과, 석사학위논문
2. 김기호(2006), “표면차수벽형 rockfill댐의 zoning에 따른 거동특성”, 충남대학교 토목공학과, 석사학위논문
3. 목혜란(2002), “중앙코아형 록필댐의 침투수량 산정방법”, 충남대학교 토목공학과, 석사학위논문
4. 박한규(2005), “락필댐의 정부침하 거동특성 연구”, 한국지반공학회, 한국지반공학회 봄학술발표회
5. 신익상(2005), “필댐의 안전성 평가 및 계측시스템 개선방안”, 충남대학교 산업대학원 토목공학과, 석사학위논문
6. 이규탁(2007), “중앙심벽형 필댐의 거동분석 및 계측관리 기법”, 충남대학교 토목공학과, 박사학위논문
7. 이준석(2010), “응력-침투 연계 해석에 의한 필 댐의 설계”, 창원대학교 토목공학과, 석사학위논문
8. 장옥성, 이종규(2004), 비균질 재료로 승상한 흙 댐의 변형 특성“, 한국지반공학회, 한국지반공학회 논문집, 제20권 8호 pp. 167~180
9. Casagrande, A.(1937), "Seepage through Dams", Contributions to soil mechanics, Boston Society of Civil Engineers, Boston, MA, pp. 295~336
10. Darcy, H.P.H(1856), " Led Fontaines Publiques de la Ville de Dijon", Paris, France: Victon Dalmont