



인공신경망기법을 이용한 중심차수벽형 석괴댐의 정부침하량 예측

Prediction of Crest Settlement of Center Cored Rockfill Dam using an Artificial Neural Network Model

김용성* · 김범주** · 오상은***†

Kim, Yong Seong · Kim, Bum Joo · Oh, Sang Eun

ABSTRACT

In this study, the settlement data of 32 center cored rockfill dams (total 39 monitored data) were collected and analyzed to develop the method to predict the crest settlement of a CCRD after impounding by using the internal settlement data occurred during construction. An artificial neural network (ANN) modeling was used in developing the method, which was considered to be a more reliable approach since in the ANN model dam height, core width, and core type were all considered as input variables in deriving the crest settlement, whereas in conventional methods, such as Clements's method, only dam height is used as a variable. The ANN analysis results showed a good agreement with the measured data, compared to those by the conventional methods using regression analysis. In addition, a simple procedure to use the ANN model for engineers in practice was provided by proposing the equations used for given input values.

Keywords: Center cored rockfill dam; crest settlement; internal settlement; ANN; core width

1. 서 론

중앙차수벽형 석괴댐 (Center Cored Rockfill Dam, 이하 'CCRD'라 한다)의 거동은 여러 가지 요인들에 의해 복합적인 영향을 받으며 댐의 설계, 시공 및 운영과 밀접한 관계가 있다. 축조재료, 다짐, 축조속도 등을 검토하여 축조된 제체는 저수위의 변화에 의해 최종적으로 영향을 받는다.

이제까지 축조된 기존의 댐 중에서 파괴를 일으켰던 대부분의 댐들이 완공 후 첫 담수 시에 그러한 영향을 나타냈다는 사실은 초기 담수 시기와 담수 속도가 댐의 안정성에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 특히 저수위가 급상승하거나 급강하 할 때는 댐의 응력-변형 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 설계 시에는 예상되는 저수위 변화를 고려하여 최적의 댐이 되도록 해야 한다.

담수 후의 CCRD의 변형은 댐 높이뿐만 아니라 저수위, 댐 기초, 록필부, 코아부의 다짐 및 재료특성 등 많은 요인에 의해 영향을 받게 되므로 이론적으로 예측하기에는 많은 오차 요인이

포함되어 있다. 따라서 담수 후의 변형을 일률적인 침하량과 댐 높이 또는 경과시간과 단순한 경험적 관계식으로는 신뢰성 있는 예측이 어려운 측면이 있으나, 축조 후 담수를 개시하기 전 담수 후의 침하량을 현장에서 손쉽게 예측할 수 있다는 장점 때문에 이러한 방법에 대해 많은 연구자들이 지속적인 관심을 가져왔다.

Lawton and Lester (1964)는 11개 록필댐에 대한 조사결과 정부침하량은 댐 높이의 함수로서 $S = 0.001 H^{3/2}$ 의 관계로 나타낼 수 있고 수평변형은 침하량의 50 % 정도이며, 상류사면이 표면차수벽형이고 상대적으로 빠른 담수를 할 경우 85 %의 정부침하량이 담수 첫해에 이루어짐을 보고하였다. Sowers et al. (1965)은 14개 록필댐에 대한 조사결과 성토 후 10년간 총 정부침하량은 $S = 0.25 \sim 1 \%H$ 의 관계에 있으며, 일정기간 내의 정부침하량을 계산할 수 있는 식을 제안하였다.

또한 Soydemir and Kjaernsli (1979)는 48개 록필댐을 4개 그룹으로 분류하여 분석한 결과 정부침하량을 계산하는 식을 $S = \beta H^{\alpha}$ 의 형태로 제안하였고 Clements (1984)는 68개 록필댐을 4개 그룹으로 분류한 후 이들의 정부침하 및 수평변형을 분석하는 새로운 접근법을 제시하였다. 한편 Dascal (1987)은 15개 록필댐에 대한 조사결과 다짐공법으로 축조된 댐 (중심코아 또는 약간 경사진 코아)의 정부침하량은 0.35 %H보다 작게 잔류하며, 하류사면의 최대침하량은 0.7 %H~0.8 %H의 범위에 이를 수 있음을 보고하였다. Habibagahi (2002)는 록필댐을 4개 그룹으로 분류한 후 정부침하량을 계측자료와 뉴로퍼지이론을 이용한

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

** 동국대학교 공과대학 건설환경공학과

*** 강원대학교 농업생명과학대학 바이오자원환경학과

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6449

Fax: +82-33-251-6463

E-mail: ohsangeun@kangwon.ac.kr

2012년 5월 14일 투고

2012년 5월 30일 심사완료

2012년 6월 13일 게재확정

침하량 산정방법을 비교하여 이러한 방법이 정부침하량 산정하는데 유용함을 입증하였다.

경험식의 제안이거나 뉴로퍼지이론이라 하더라도 정부침하량만을 다룬 점에서 아쉬운 측면이 있다.

그러나 이들 연구는 단순한 정부침하량의 예측자료를 이용한

본 연구에서는 32개 중앙차수벽형 석괴댐의 예측자료 (39개

Table 1 Summary of CCRD data used in this study

No.	Name	Location	Year Completed	Dam Zoning	Core width (W/H)	Core type	Height, H (m)	Length, L (m)	Ratio L/H	Slope (U)	Slope (D)
1	Bradbury	USA	1953	4,1,1	0.5-1.25	SC/GC	85	1022	12	3.25	2.25
2	Glenbawn (M)	Australia	1957	5,1,0	0.5-1.25	CL	76.5	823	10.8	3-4	2.5-5
3a	Upper Yarra	Australia	1957	5,0,0	0.5-1.25	CL	90	610	6.8	2.4	2.4
3b	Upper Yarra	Australia	1957	5,0,0	0.5-1.25	CL	90	610	6.8	2.4	2.4
4	Tooma	Australia	1961	4,1,2	0.5-1.25	SM	67	305	4.6	2.5	2.25
5	Eppalock	Australia	1962	5,2,0	0.5-1.25	CL	47	700	14.9	1.9	1.65
6	El Infiernillo	Mexico	1963	5,2,0	< 0.25	CL/CH	148	344	2.3	1.75	1.75
7	Burrendong	Australia	1963	4,2,1	0.5-1.25	CL	76	1130	14.9	2.5	2.25
8a	Netzahualcoyotl	Mexico	1964	5,2,0	< 0.25	MH	132	480	3.6	2	2
8b	Netzahualcoyotl	Mexico	1964	5,2,0	< 0.25	MH	132	480	3.6	2	2
9a	San Luis (M)	USA	1967	4,2,1	> 2.5	CL	116	5650	48.7	3-8	2.25-6
9b	San Luis (M)	USA	1967	4,2,1	> 2.5	CL	116	5650	48.7	3-8	2.25-6
10	Blowering	Australia	1968	5,2,0	0.25-0.5	SC/CL	112	808	7.2	1.9	1.9
11	Parangana	Australia	1968	5,2,2	0.25-0.5	SM	53	189	3.6	1.33	1.33
12a	Wyangala	Australia	1968	5,2,0	0.25-0.5	SC/SM	86	1510	17.6	1.5	1.6
12b	Wyangala	Australia	1968	5,2,0	0.25-0.5	SC/SM	86	1510	17.6	1.5	1.6
13	Talbingo	Australia	1970	5,2,0	0.25-0.5	CL	162	701	4.3	2	2
14	Shimokotori	Japan	1972	5,1,0	< 0.25	GC	119	289	2.4	2.4	1.85
15	Soyanggang	Korea	1972	5,1,1	< 0.25	SM/SC	123	530	4.3	2	2
16	Copeton	Australia	1973	5,2,0	0.25-0.5	SC	113	1484	13.1	1.7	1.8
17	Maroon	Australia	1973	5,2,2	0.5-1.25	SC/CL	52	460	8.8	1.5	1.5
18	Fukada	Japan	1976	4,1,2	0.25-0.5	GC	55.5	340	6.1	2.75	2.75
19	Andong	Korea	1976	5,1,1	< 0.25	SW/SM	83	612	7.4	2	1.7
20	Googong	Australia	1977	5,2,0	0.25-0.5	SC	62	423	6.8	1.8	1.7
21a	Dartmouth	Australia	1978	5,2,0	0.25-0.5	SC/SM	180	670	3.7	1.75	1.75
21b	Dartmouth	Australia	1978	5,2,0	0.25-0.5	SC/SM	180	670	3.7	1.75	1.75
22	Tedorigawa	Japan	1978	5,2,0	< 0.25	GM/GC	153	420	2.7	2.6	1.85
23	Chaffey	Australia	1979	5,2,0	0.25-0.5	CH/GC	54	530	9.8	1.75	1.75
24	Chicoasen	Mexico	1980	5,2,0	< 0.25	GC	261	463	1.8	2.35	2
25	Split Yard Creek	Australia	1980	5,2,1	0.25-0.5	CL	76	1141	15	1.75	1.8
26	Frauenau	Germany	1981	5,2,0	< 0.25	SM	80	670	8.4	1.5	1.5
27a	Wivenhoe	Australia	1982	5,2,1	< 0.25	CL	59	1200	20.3	1.75	1.75
27b	Wivenhoe	Australia	1982	5,2,1	< 0.25	CL	59	1200	20.3	1.75	1.75
28	Windemere	Australia	1984	5,2,1	0.25-0.5	CL	67	825	12.3	1.65	1.55
29	Glenbawn (S)	Australia	1986	5,2,0	0.25-0.5	CL	35	585	16.7	1.5	1.5
30a	Juam (M)	Korea	1992	5,1,0	< 0.25	SM/SC	58	330	5.7	2.2	1.8
30b	Juam (R)	Korea	1992	5,1,0	< 0.25	SM/SC	99.9	562.6	5.6	2.2	1.8
31	Imha	Korea	1993	5,1,0	< 0.25	SC/CL	73	515	7.1	2	2.2
32	Boryeong	Korea	1998	5,1,0	< 0.25	CL	50	291	5.8	2.2	1.9

지점) 및 인공신경망 기법의 적용을 통해 댐 축조단계에서 얻어지는 계측 자료를 이용하여 담수 후 댐의 정부침하량을 예측하는 기법을 개발하도록 한다. 이러한 연구를 통해 얻어진 결과물

은 중앙차수벽형 석괴댐의 여성고 결정 등 댐 설계·시공 및 계측관리의 신뢰도 증진 등 댐 유지관리 측면에서 댐 기술자에게 좋은 보조적 틀이 될 것으로 기대된다.

Table 2 Relative settlement (settlement/dam height) of CCRD during and after construction

No.	Name	Height, H (m)	Dry Density (t/m ³)		Internal settlement		Crest settlement			References
			Core	Rockfill	mm	%H	mm	%H	years	
1	Bradbury	85	1.81		720	0.85	215	0.25	44	4)
2	Glenbawn (M)	76.5			2425	3.17	760	0.99	27	4)
3a	Upper Yarra	90	2.05	2.08	2380	2.64	533	0.59	41	4)
3b	Upper Yarra	90	2.05	2.08	2190	2.43	533	0.59	41	4)
4	Tooma	67	1.72		1527	2.24	121	0.18	38	4)
5	Eppalock	47	1.73	2.05	1015	2.16	510	1.09	37	4)
6	El Infiernillo	148	1.59	1.76-1.85	3815	2.58	1190	0.8	17	4)
7	Burrendong	76		2.05	1795	2.36	330	0.43	34	4)
8a	Netzahualcoyotl	132	1.65		2970	2.25	596	0.45	5.6	4)
8b	Netzahualcoyotl	132	1.65		2970	2.25	760	0.58	2.75	4)
9a	San Luis (M)	116			2120	1.83	415	0.36	30	4)
9b	San Luis (M)	116			3060	2.64	415	0.36	30	4)
10	Blowering	112		2.06-2.07	5875	5.25	1180	1.05	28	4)
11	Parangana	53			351	0.66	111	0.21	26.5	4)
12a	Wyangala	86	2.02	2.12	1530	1.78	376	0.44	31	4)
12b	Wyangala	86	2.02	2.12	1550	1.8	376	0.44	31	4)
13	Talbingo	162	1.84	1.92-2.07	2410	1.49	540	0.33	28	4)
14	Shimokotori	119			3850	3.24	542	0.46	13	4)
15	Soyanggang	123	1.93	1.84-1.98	2000	1.63	418	0.34	34	6)
16	Copeton	113	1.76	1.87-1.99	3575	3.16	781	0.69	25	4)
17	Maroon	52			1120	2.15	269	0.52	20	4)
18	Fukada	55.5			755	1.36	130	0.23	7	4)
19	Andong	83	2.1	1.92	1040	1.25	482	0.58	29	6)
20	Googong	62			1180	1.9	233	0.38	13	4)
21a	Dartmouth	180	1.87	2.1	3220	1.79	1189	0.66	20	4)
21b	Dartmouth	180	1.87	2.1	7070	3.93	1189	0.66	20	4)
22	Tedorigawa	153	1.9	1.98	5860	3.83	675	0.44	9	4)
23	Chaffey	54	1.86	2.02	911	1.69	149	0.28	17.5	4)
24	Chicoasen	261			6650	2.55	849	0.33	0.75	4)
25	Split Yard Creek	76	1.71	2	1320	1.74	329	0.43	19	4)
26	Frauenau	80			1254	1.57	150	0.19	3	4)
27a	Wivenhoe	59		1.98-2.2	1085	1.84	181	0.31	16	4)
27b	Wivenhoe	59		1.98-2.2	840	1.42	181	0.31	16	4)
28	Windemere	67		2.15	2134	3.19	405	0.6	14	4)
29	Glenbawn (S)	35		2.12	508	1.45	225	0.64	12	4)
30a	Juam (M)	58	1.9	2.069	470	0.81	810	0.371	15	6)
30b	Juam (R)	99.9	1.97	1.9	1150	1.151	1151	0.579	15	6)
31	Imha	73	2.03	1.92-2.12	672	0.921	921	0.29	16	6)
32	Boryeong	50	2	1.9-2.0	32.4	0.448	648	0.402	8	6)

※ 4): Hunter (2003), 6): K-water (2005)

II. 계측자료를 이용한 CCRD의 축조 전·후의 침하 거동 분석

Table 1은 6개국의 CCRD 중에서 축조 중의 내부침하량 및 담수 후의 정부침하량 계측자료가 확보된 32개 CCRD에 대한 현황을 나타낸다. 3a, 3b와 같이 같은 숫자에 a와 b로 표시된 것은 같은 댐에서 단면이 다른 경우를 의미한다. Dam Zoning에 나열된 숫자 세 개는 각각 Embankment zoning category, Embankment filter classification, Foundation filter classification을 나타낸다. Embankment zoning category에서 4와 5는 각각 Zoned earth and rockfill dam 및 Central core earth and rockfill dam을 의미한다. Filter classification에서 0은 No filter drains present, 1은 One filter present, 2는 Two (or more) filter zones present를 나타낸다. 예를 들어 Bradbury dam의 경우 4, 1, 1과 같이 적혀 있는데, 이 숫자는 댐 형식이 준형인 사력댐으로 필터가 제체에 하나 댐 기초에 하나씩 설치되어 있는 경우를 의미한다.

Table 2는 CCRD의 건설 중과 건설 후의 상대 침하량 (침하량/댐 높이)을 나타낸 것이다. 내부침하량 (Internal settlement)은 댐 축조 중 제체 내부에서 발생한 침하량의 최대치를 의미하고 정부침하량 (Crest Settlement)은 담수 후 제체의 정상부에서 발생한 정부침하량의 최대치를 의미하며, 계측기간을 정부침하량의 최대치 (mm) 및 댐 높이로 나눈 상대침하량 (%H)과 함께 표기하였다.

1. 댐 높이에 따른 침하 특성

CCRD에서의 침하관리를 위한 계측은 주로 시공시 설계조건 확인, 완성후 댐의 안전관리를 목적으로 실시한다. 시공시 댐체의 측방변위의 계측은 시공관리와 사면활동을 예측할 수 있는 중요한 단서를 제공하므로 성토 중에 댐체의 침하를 계측하는 것은 안전관리상 중요한 지표가 된다.

CCRD는 완공 후에 일반적으로 변형률은 감소하지만 수직, 수평 및 용기 등의 변형은 장기간 지속되며 그러한 변형은 댐 거동의 안정 여부를 암시하게 되고 댐의 안전관리에 중요한 평가항목이 된다. 따라서 건설 후 변형 거동을 예측하고 이를 계측된 자료와 비교하는 방법을 통해 댐의 잠재적 문제점에 대한 평가 및 대책을 검토하게 된다.

Fig. 1은 사력댐의 높이와 정부침하량과의 관계를 나타낸 것이며 여러 연구자들이 경험식들을 이용하여 정부침하량을 산정하는 공식을 제안한 바 있다 (Lawton and Lester, 1964; Sowers et. al., 1965; Soydemir and Kjaernsli, 1979; Clements, 1984). Lawton and Lester (1964)는 11개 록필댐의 조사 결과

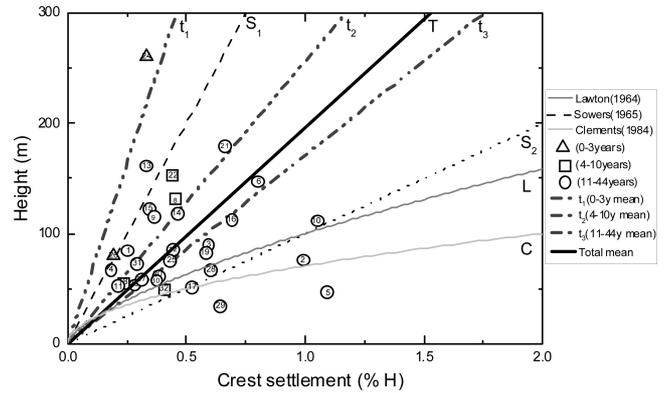


Fig. 1 Dam height vs. crest settlement

댐 높이와 침하량과의 관계는 $s = 0.001 H^{3/2}$ 의 관계가 있으며, Sowers et al. (1965)은 14개 록필댐에 대한 조사결과 성토 후 10년간의 총 침하량 $s = 0.25 \sim 1$ %H의 관계가 있고 일정기간 내의 침하량은 $\Delta H = \alpha(\log t_2 - \log t_1)$ ($\alpha = 0.2 \sim 0.7$)의 관계임을 제안하였다.

Soydemir and Kjaernsli (1979)는 48개 록필댐에 대한 조사결과 정부침하량을 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$s = \beta H^\delta \quad (1)$$

여기서, s는 정부침하량 (m), β 는 계수, δ 는 지수, H는 댐 높이 (m)

다만, 이들의 연구는 비다짐 공법의 차수벽형 댐 및 경사코어형 댐에 관한 연구 및 다짐공법의 차수벽형 댐에 관한 연구가 주류를 이루었으며 CCRD의 정부침하량에 대한 연구는 Clements (1984)에 의해서 계속 되었다.

Clements (1984)는 중앙차수벽형 석괴댐의 정부침하량은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있음을 제안하였다.

$$s = \beta' H^{\delta'} \quad (2)$$

여기서, s는 정부침하량 (m), β' 는 계수 (2×10^{-4} 를 적용), δ' 는 지수 (2를 적용), H는 댐 높이 (m)

Fig. 1에서 살펴보면, 32개 CCRD의 계측자료를 담수 직후 (0 ~ 3년) 및 담수 후 4 ~ 10년 경과, 11 ~ 44년 경과 등으로 3가지 타입으로 구분하여 도시하였으며 이들의 평균값을 계산하여 점선으로 표시하였고 ($t_1 \sim t_3$ 참조), 전체의 평균값을 굵은 실선 (T)으로 표시하였다. Fig. 1을 보면 Lawton and Lester (1964) 및 Clements (1984)의 제안 식은 정부침하량을 과다 예측함을 알 수 있으며 Sowers (1965)의 제안은 담수 후 10년 경과 후의 정부침하량은 폭넓은 범위로 예측하여 활용성 측면에서 의미가

되색되고 있음을 알 수 있다. 한편, 32개 CCRD의 정부침하량 전체 평균 직선을 살펴보면 대체로 100 m 높이의 댐이면 0.5 %H의 정부침하량을 나타냄을 알 수 있다. 또한 담수 후 시간이 경과 할수록 정부침하량도 함께 증가하나 그 증가폭은 점차 둔화되고 있음을 볼 수 있다.

2. 축조 중 및 축조 후 침하 특성

CCRD에서 대부분의 침하는 건설기간 중에 발생하지만 건설 후에도 매우 완만한 속도로 침하가 일어나며 침하율은 시간이 경과함에 따라 점점 감소하는 추세를 보인다. Fig. 2는 32개 댐의 내부침하량과 정부침하량과의 관계를 나타낸 것으로 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Crest settlement} = 0.213 \times \text{Internal settlement} \quad (3)$$

Kim and Kim (2008)은 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 (Concrete Faced Rockfill Dam, 이하 'CFRD'라 한다)의 경우 정부침하량은 내부침하량의 0.247배 정도임을 보고한 바 있는데 CCRD의 경우 CFRD에 비하여 내부침하량이 크게 발생하기 때문에 정부침하량은 내부침하량의 0.213배 정도로 CFRD 보다는 다소 작은 것으로 나타났다.

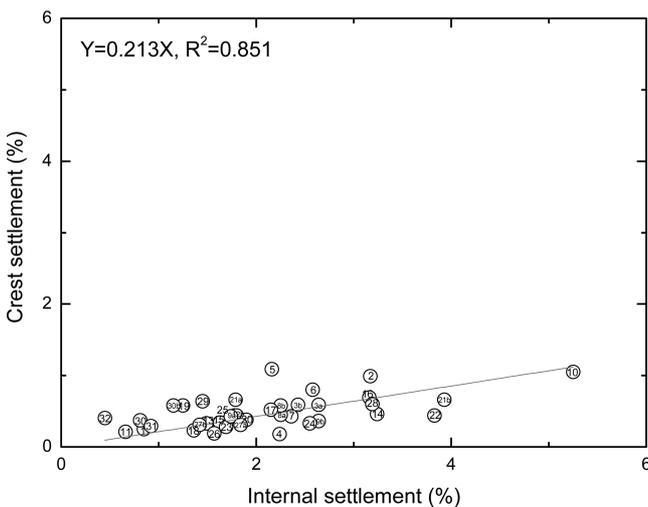


Fig. 2 Crest settlement vs. internal settlement

III. 인공신경망 기법을 이용한 CCRD의 축조 전·후의 거동 분석

인공신경망은 인간의 뇌 구조에서 학습되고 축적되는 기존 지식의 운용체계를 모사한 컴퓨터 모델로서, 뉴런 (neuron) 혹은

노드 (node)로 불리는 단위처리개체 (simple processing unit)로 이루어져 있다. 각 노드는 입력신호에 대한 연산을 수행한 후 연결고리 (connection)들을 통하여 다음 뉴런에 정보를 전달하는 처리개체이다. 여기서, 연결고리는 하나의 노드로부터 다음 노드로의 정보 흐름을 의미한다. 가중치는 연결고리를 통하여 할당되며, 결과적으로 가중치가 고려된 입력 신호값이 다음 뉴런에 전달된다. 일반적으로, 인공신경망은 자료들을 제공받는 입력층 (input layer), 입력과 출력 사이의 복잡한 관계를 나타내는 은닉층 (hidden layer), 그리고 출력층 (output layer)으로 나누어진다.

본 연구에서는 인공신경망 모델을 훈련하는데 가장 많이 사용되고 있는 역전파 알고리즘 (Backpropagation Algorithm)을 사용하였으며, 역전파 알고리즘은 인공신경망 모델을 학습시키는데 2가지 단계를 거치게 된다. 우선 입력값을 전달함수를 이용하여 출력값 방향으로 순방향 처리와, 다음으로 목표값과 계산값의 차이를 역방향으로 진행시키면서 오차가 최소화 되도록 층과 층 사이의 연결강도를 조절하게 된다 (Fig. 3 참조). 출력값은 사용된 전달함수에 따라 달라지게 되는데 본 연구에 사용된 전달함수는 Sigmoid 함수로써, 비선형 함수로 인공신경망 모델의 활성화 함수로 가장 많이 사용되고 있는 함수이다.

인공신경망 기법은 신경생물학적 체계를 기반으로 경험을 통해 학습하는 인간 뇌구조와 유사하게 주어진 입력-출력의 데이터군으로 학습하는 개념을 적용하므로 기존의 수치해석적 방법들 보다 다소 불규칙적이며 체계적이지 않은 관계의 모델링에 우수한 적용성을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 수집된 계측자료를 바탕으로 인공신경망 기법을 적용하여 CCRD의 정부침하량을 예측하는 기법을 개발하고자 하였다.

정부침하량 예측에 최적합한 인공신경망 모델 구조를 결정하

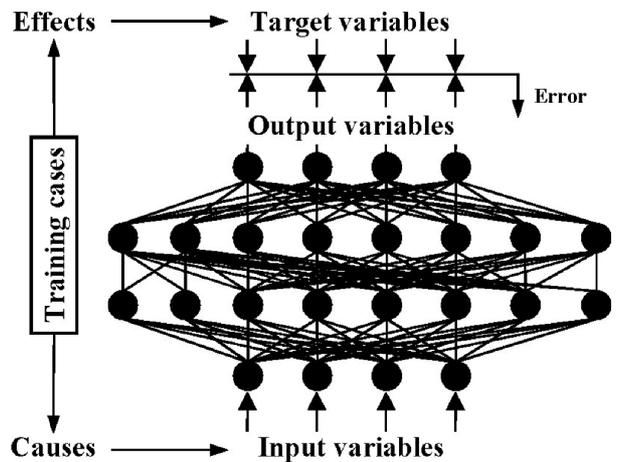
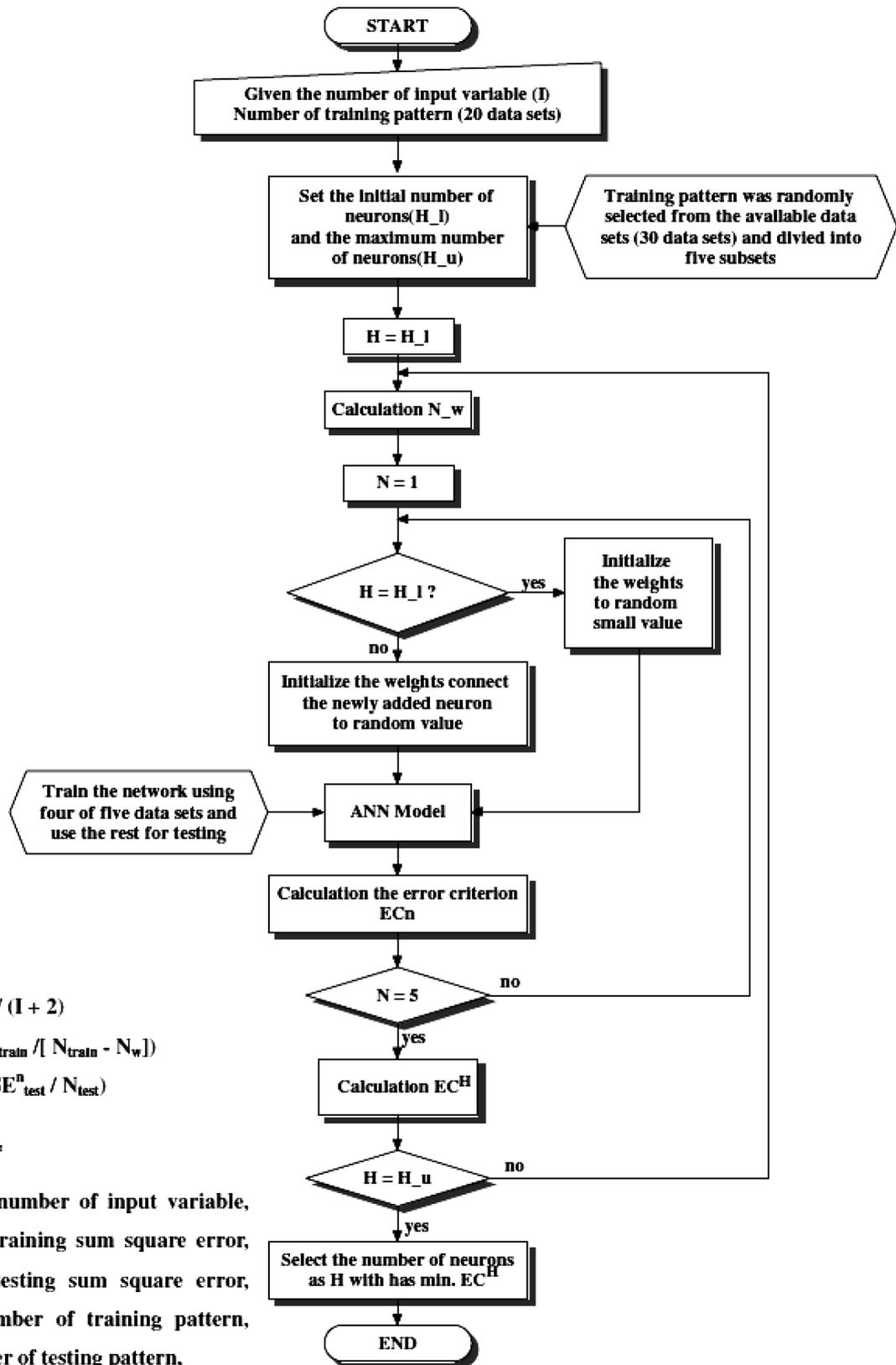


Fig. 3 Schematic diagram of a supervised learning algorithm (Shin, 2001)



INDEX

$$H_l = I/2$$

$$H_u = (N_{train} - 1) / (I + 2)$$

$$EC_n = \log (SSE^n_{train} / [N_{train} - N_w]) + \log (SSE^n_{test} / N_{test})$$

$$EC^H = \frac{1}{5} \sum_{n=1,5} EC_n$$

where, I : the number of input variable,
 SSE^n_{train} : the training sum square error,
 SSE^n_{test} : the testing sum square error,
 N_{train} : the number of training pattern,
 N_{test} : the number of testing pattern,

Fig. 4 Flow chart for the cross-validation method (Kim and Kim, 2008)

기 위하여 입력층과 은닉층 구성을 달리한 네 종류의 모델에 대하여 모델링을 수행하였으며, 수집된 총 39개 data set 중 학습 (training)을 위해 29개 data set을 사용하고 10개 data set을 검증 (validation)에 이용하였다. 모델링은 학습율 0.9와 학습 모멘텀 0.9로 수행하고 최적의 학습/예측모델은 trial and error 기법으로 결정하였으며, 신경망 학습동안의 신경망내 세포 (neuron) 간의 과도한 상호연결에 따른 memorizing 또는 over-fitting를 방지하기 위하여 cross-validation 기법을 적용하였다. Table 3은 최적 신경망 모델 도출을 위한 네 종류의 모델 구성을 나타내며, Fig. 4는 적용된 cross-validation 기법의 계산 흐름도를 나타낸다.

Fig. 5는 모델링 결과 각 모델별 실측 및 예측된 정부침하량비 (Relative crest settlement, 이하 'RCS'라 한다. 'RCS = 정부침하량/높이') 값들을 비교한 결과이다. 그림에서 보듯이 Model 1과 Model 2, 그리고 Model 4는 전체적으로 침하량을 과대평가하고 있는 반면, Model 3은 그에 비해 비교적 편향성이 적은 것으로 나타났다. 그리고 오차에 대한 통계치를 계산한 결과도 Model 3의 경우 평균 0.148%, 표준편차 0.079%, 그리고 평균제곱근오차 (RMSE)가 0.184%로 타 모델들과 비교해 가장 낮게 나타나 Model 3이 정부침하량 예측에 가장 적합한 모델인 것으로 평가되었다.

Table 3 Artificial neural network models used in this study

Model	Input variables
Model 1	Dam height, Core width
Model 2	Dam height, Core width, Core type
Model 3	Dam height, Core width, Dam length to height ratio (L/H)
Model 4	Dam height, Core width, Core type, Dam length to height ratio (L/H)

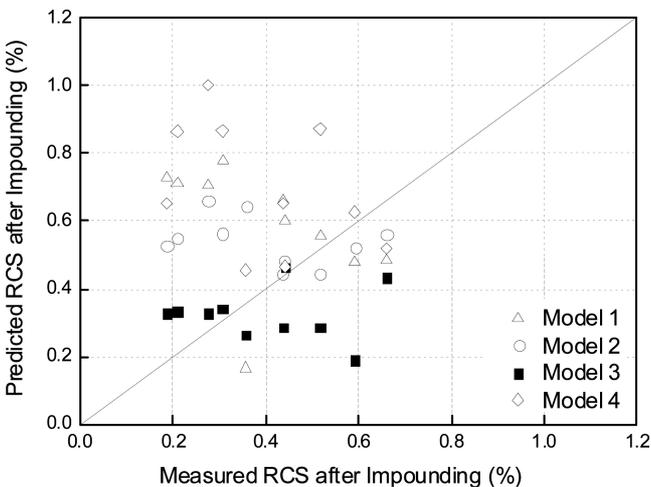


Fig. 5 Measured and predicted RCS for four ANN models

Table 4 Sensitivity analysis results for Model 3

Input variables	Core width	Dam height	Dam L/H
Relative sensitivity (%)	59.61 %	37.41 %	2.98 %

또한, Model 3에 대하여 각 입력변수 (댐 높이, 코아 폭, 댐 형상비)들이 출력값 (정부침하량)에 미치는 상대적인 영향을 평가하기 위하여 민감도 해석을 수행한 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 각 입력변수에 대한 상대 민감도는 코아 폭이 59.6%로 가장 높고 댐 높이와 댐 형상비에 비해 정부침하량에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

1. 최적 인공신경망과 결정론적 방법의 비교

본 연구에서는 결정론적 방법으로 Clement 식과 Table 1의 자료에 근거하여 회귀분석한 결과식을 비교 대상으로 고려하였다. Clement의 식과 동일한 댐 높이를 변수로 하여 회귀분석을 수행하여 도출한 정부침하량과 댐 높이의 관계는 다음과 같다.

$$s = 0.016H^{0.772} \quad (R^2 = 0.37) \quad (4)$$

여기서, s는 정부침하량 (m), H는 댐 높이 (m)이다.

Fig. 6은 인공신경망 모델 개발시 학습에 사용하지 않은 10개의 데이터를 위의 식과 Clement의 식, 그리고 개발된 인공신경망 (ANN)에 각각 적용해 얻은 결과를 모두 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Clement 식은 전체적으로 정부침하량을 과소 평가하고 식 (4)는 반대로 정부침하량을 다소 과대 평가하는 경향이

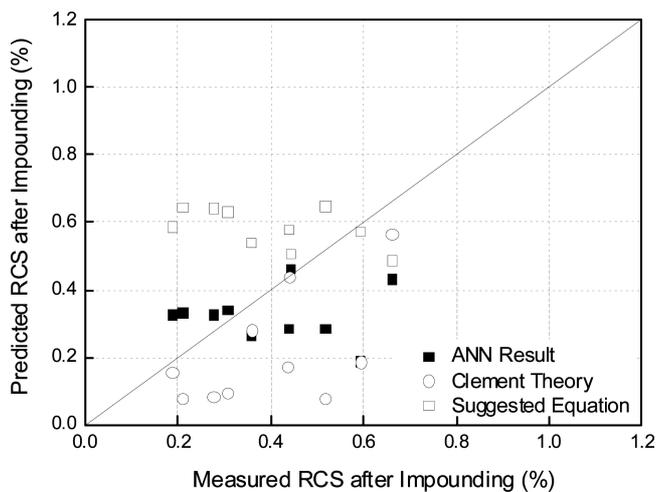


Fig. 6 Measured and predicted RCS for ANN and regression models

Table 5 Statistics for ANN and regression model errors

Model	Statistics for model errors		
	Mean (%)	Standard Deviation (%)	RMSE (%)
ANN (Model 3)	0.148	0.079	0.184
Clement Theory	0.184	0.149	0.232
Suggested Equation	0.225	0.147	0.265

있는 반면, ANN 모델을 적용한 결과는 상대적으로 그러한 편향성이 가장 적은 것으로 나타났다.

특히, RCS값이 0.2~0.5 %인 범위에서 ANN 모델은 회귀분석식을 이용한 경우에 비해 비교적 예측 정확도가 높게 나타났다. 또한, Table 5에서 나타난 바와 같이 ANN 모델에 대해서 전체적으로 실측치와 예측치의 오차가 가장 적은 것으로 나타나 결과적으로 인공신경망을 이용한 방법이 회귀분석식을 이용한 결정론적 방법에 비해 정부침하량을 예측하는 데 보다 효과적인 것으로 나타났다.

2. 정부침하량 예측을 위한 계산절차

본 연구에서 개발된 인공신경망 모델은 임의의 CCRD에 대하여 정부침하량을 예측하는데 적용될 수 있을 것이며, 개발 모델의 최종 연결강도와 바이어스에 기초하여 현업에서 기술자들이 보다 간편히 CCRD의 정부침하량을 예측할 수 있는 계산 틀을 다음과 같이 제시하고자 한다. 이는 수집된 데이터들을 이용하여 Training, Test, Validation 과정을 통해 얻어진 Matrix의 형태의 인공신경망 노드들과 최종 연결강도의 관계를 정리해 나타낸 것이다.

Step 1. 입력변수 (댐 높이, 코아 폭, 댐 형상비)를 0.1~0.9로 정규화 한다. 각 입력변수의 정규화 식은 다음과 같다.
 댐 높이 (H): $I_1 = 0.8 (H + 37.5)/300$
 코아 폭 (C_{width}): $I_2 = 0.8 (C_{width} + 6.25)/50$
 댐 형상비 (L/H): $I_3 = 0.8 (L/H + 1.875)/15$

Step 2. 은닉층 입력값들을 계산한다. 각 은닉층에 대한 계산식은 다음과 같다.

- For the first neuron:
 $N_1 = 4.1414 I_1 + 1.1427 I_2 - 1.1294 I_3 - 4.8659$
- For the second neuron:
 $N_2 = -0.3374 I_1 - 0.1253 I_2 + 5.2757 I_3 + 1.5478$
- For the third neuron:
 $N_3 = -0.9566 I_1 + 4.2808 I_2 + 1.703 I_3 - 1.744$
- For the forth neuron:
 $N_4 = 2.6996 I_1 - 2.3231 I_2 + 6.0209 I_3 + 5.4064$

Step 3. 출력층에서의 CCRD 정부침하량을 계산한다. 출력층 output은 은닉층과 출력층간의 연결강도와 뉴런 활성화 함수 그리고 다음의 출력층 입력값으로 계산한다.

- $A = -0.7067 f (N_1) - 2.6846 f (N_2) + 1.7219 f (N_3) + 2.7021 f (N_4) - 2.02$
 - $RCS (\%) = [3.75 f (A) - 0.375]/H$
- 여기서, $f (x)$ 는 활성화함수이며 식은 $1/(1 + e^{-x})$ 이고 H는 댐 높이 (m)이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 32개 중상차수벽형 석괴댐의 계측자료 (39개 지점) 및 인공신경망 기법의 적용을 통해 댐 축조단계에서 얻어지는 계측 자료를 이용하여 담수 후 댐의 정부침하량을 예측하는 기법을 개발하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론을 다음과 같다.

1. 중상차수벽형 석괴댐 (CCRD)의 정부침하량을 예측할 수 있는 인공신경망 모델을 제안하였으며, 새로운 인공신경망 모델을 이용한 정부침하량은 실측한 결과와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.
2. 기존에 많이 적용되고 있는 Clement의 식은 댐 높이만을 변수로 하고 있지만 개발된 인공신경망 모델은 댐 높이, 코아 폭, 댐 형상비를 변수로 하여 정부침하량의 예측 신뢰성을 증진하고 있다.
3. 개발한 모델의 간편한 적용을 도모하기 위하여 입력변수의 값을 적용하여 각 뉴런층에서 수치계산이 가능한 해를 제시함으로써 실무 기술자들이 간편히 계산할 수 있는 틀을 제공하였다.

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업 (과제#11기술혁신E02)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Clements, R. P., 1984. Post-Construction Deformation of Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical Engineering* 110(7): 821-837.
2. Dascal, O., 1987. Postconstruction Deformations of Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical Engineering* 113(1): 46-59.
3. Habibagahi, G., 2002. Post-construction Settlement of Rockfill Dams Analyzed via Adaptive Network-based

- Fuzzy Inference Systems. *Computers and Geotechnics* 29: 211-233.
4. Hunter, G., 2003. The Pre- and Post-failure Deformation Behavior of Soils Slopes. Ph.D. Thesis, Univ. of New South Wales, New South Wales, Australia.
 5. Kim, Y. S. and B. T. Kim, 2008. Prediction of Relative Crest Settlement of Concrete-faced Rockfill Dams Analyzed using an Artificial Neural Network Model. *Computers and Geotechnics* 35: 313-322.
 6. K-water, 2005. Dam Intergration Information System. Technical report. Korea Water Resources Corporation, Korea (in Korean).
 7. Lawton, F. L. and M. D. Lester, 1964. Settlement of Rockfill Dams. Proceedings, *Eighth International Congress on Large Dam*. Q.32 R.2. Edinburgh, Scotland 3: 599-613.
 8. Shin, H., 2001. Neural Network Based Constitutive Models For Finite Element Analysis. Ph.D Thesis, University of Wales, Swansea, United Kingdom.
 9. Soydemir, C. and B. Kjaernsli, 1979. Deformation of Membrane-faced Rockfill Dams. *Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 3: 281-284.
 10. Sowers, G. F., R. C. Williams and T. S. Wallace, 1965. Compressibility of Broken and the Settlement of Rockfills. Proceedings, *Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Toronto, Canada 2: 561-565.