

## 콘크리트 표면차수벽형 석피댐(CFRD)의 누수특성에 관한 사례연구 A Case Study on the Leakage in Concrete Face Rockfill Dam

방돈석<sup>1)</sup>, Don-suk Bang, 신창건<sup>2)</sup>, Chang-gun Shin, 이강용<sup>3)</sup>, Kang-yong Lee, 안상로<sup>4)</sup>, Sang-ro Ahn,

<sup>1)</sup> 한국시설안전기술공단 댐항만실 차장, Manager, Dam Safety Division, Korea Infrastructure Safety & Technology(KISTEC)

<sup>2)</sup> 한국시설안전기술공단 기술개발실 차장, Manager, R&D Team, KISTEC

<sup>3)</sup> 한국시설안전기술공단 댐항만실 직원, Staff, Dam Safety Division, KISTEC

<sup>4)</sup> 한국시설안전기술공단 댐항만실 실장, Director, Dam Safety Division, KISTEC

**SYNOPSIS** : The leakage quantity through concrete facing of Concrete Face Rockfill Dam(CFRD) is very small due to its low permeability of intact concrete. Even though the concrete facing is well designed and constructed, fine cracks can be generated due to effects of thermal and drying shrinkage. Therefore, it can be said that the leakage from the CFRD is subjected to not permeability of intact concrete but poor joints, cracks and foundation rocks. The Safety of a dam on leakage was evaluated based on the comparison between apparent permeability estimated and leakage quantity measured. The above method can be concluded to give a good direction for the evaluation of safety on CFRD in maintenance aspects as design and construction technology is improved with the accumulation of leakage data.

Key words : concrete face rockfill dam(CFRD), estimation of leakage, apparent concrete permeability, crack in facing, perimetric joint

### 1. 서 론

콘크리트 표면차수벽형 석피댐(Concrete Face Rockfill Dam : CFRD)은 입경이 큰 암석재료로 구성되어 구조적으로 안정하며 시공측면에서도 다른 형식의 필댐보다 공기상 유리한 특징을 가지고 있다. 또한, 우리나라의 지질구조상 CFRD의 주 축조재료인 암석자원이 풍부하여 다른 필댐보다 경제적인 설계가 가능하다고 하겠다. 이로 인해 최근에는 밀양댐, 영월댐, 동북댐, 평화의댐 등 CFRD로 축조된 댐이 증가하는 추세이다. 그러나, CFRD는 현재 국내·외적으로 설계 및 시공방법에 따른 충분한 기술축적이 이루어지지 않았고 축조 경험 또한 일천한 상태이다.

일반적으로 콘크리트 자체의 투수계수는 대개  $1 \times 10^{-11}$  m/sec 이므로 차수벽을 통과하는 누수량은 매우 작게 된다. 그러나 차수벽의 설계와 그 시공이 양호하더라도, 실제 현장에서는 온도 및 건조수축에 의한 미세 균열이 발생하게 되어, CFRD에서의 누수량은 콘크리트의 투수계수에 지배를 받기보다는 조인트부위, 균열부위 및 기초암반 등으로부터의 누수가 지배하는 것으로 알려져 있다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 CFRD에 대한 누수특성을 파악하고, 외견상 투수성(Apparent permeability)에 의한 누수량 산정방법을 통한 누수량 관리기준 설정방안을 제시코자하였다.

## 2. 누수량 산정 방법

표면차수벽을 치수가 큰 석재가 지지토록 하던 과거에는 콘크리트 저부에 받쳐있던 돌이 빠져나간 경우에도 차수벽에 악영향을 주지 않도록 콘크리트 차수벽의 두께를 비교적 크게 하였다. 그러나, 근래에는 다짐공법의 발달로 콘크리트 지지층을 사력재 또는 쇄석재 등으로 고르게 다져서 시공하면서  $0.3m + 0.004H$ 의 두께로 하였고, 최근에 이르러서는  $0.3m + 0.002H$  ( $H$  : 차수벽 임의지점에서의 수심)까지 점점 얇아지고 있는 추세이다.

필댐의 경우 제체 또는 기초지반내의 침투수를 해석하여 침윤선, 유속분포 및 누수량을 확인하고 제체 하류측으로 안전하게 배수되도록 하여야 하는데 이는 침투수에 의하여 제체 내부에 형성된 침윤선이 댐의 안정에 지배적인 요소로 작용하기 때문이다(건설교통부, 2001). 그러나, CFRD에서는 차수벽에 의해 기본적으로 누수가 제어되며 제체 내부의 경우에도 투수계수가 매우 큰 석재로 축조되어 차수벽을 통한 누수가 침윤선을 형성하지 않고 기초저면을 따라 배출되는 것이 일반적이다. 결국, 유지관리측면에서도 CFRD에서의 누수량을 이론적으로 산출하는 데는 무리가 있어 누수량측정장치를 설치하고도 댐체를 통한 누수량에 대한 관리기준치가 마련되어 있지 않은게 현실이다.

Casinader와 Rome(1988)에 의하면 콘크리트 자체의 투수계수가 아닌 외견상 투수성(Apparent permeability)을 이용하여 차수벽을 통한 누수량을 산정하였으며, 그 과정을 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 1은 차수벽을 통한 누수 분석을 위한 기본적인 인자의 정의와 함께 CFRD의 상류사면 표고 및 이상적인 단면을 보여주고 있다. 또한, 이상적인 모델을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 저수지는 만수 상태이며, 댐마루의 표고는 동일하다고 가정한다.
- 계곡의 형상은 삼각형이라 가정하며, 댐의 표고 또한 삼각형상이다.

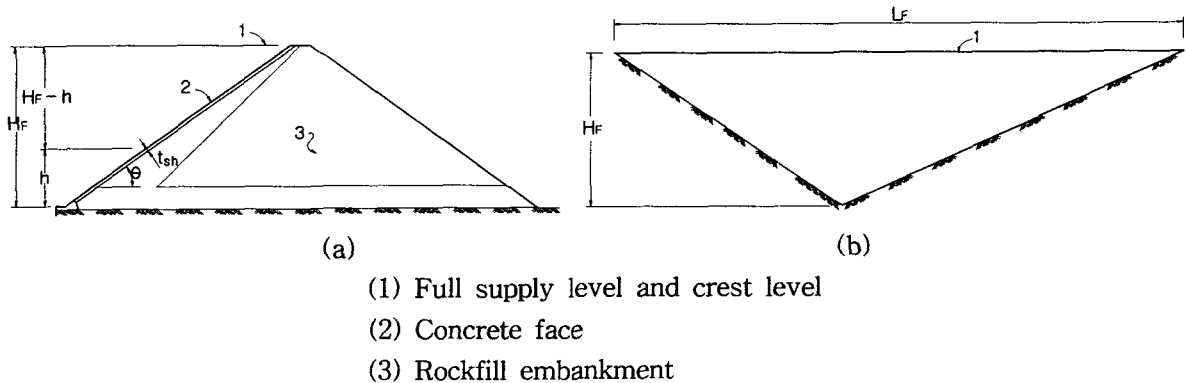


Fig. 1 Idealised Form of Dam (a) Cross section (b) Elevation of Dam

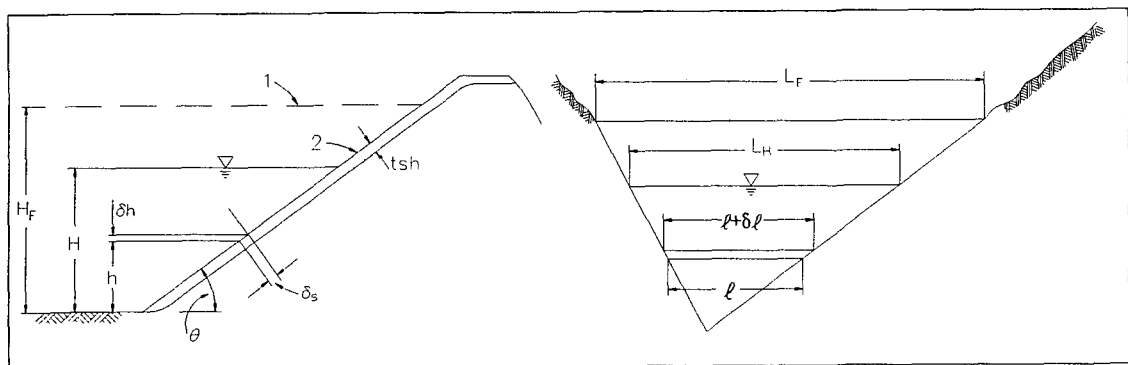


Fig. 2 Derivation of apparent permeability relationship (a) Cross section (b) Elevation of Dam

상기 모델을 기초로한 누수량 산정방법을 정리하면 다음과 같다.

차수벽의 두께는 일반적으로  $t_{sh} = m + n(H_F - h)$  로 표시 할 수 있다. 여기서,  $t_{sh}$ 는 차수벽의 두께,  $m$ 은 차수벽의 최소두께(댐마루 지점),  $n$ 은 수심 증가에 따른 차수벽 두께의 증가율,  $H_F$ 는 댐높이,  $h$ 는 바닥으로부터의 높이이다.

차수벽은 투수성이 있으나 등방성이며, 콘크리트를 통한 흐름은 층류라고 가정한다. 또한, 차수벽을 통한 흐름은 Darcy의 법칙에 따른다. 기본적인 가정과 이 방법에 의한 인자는 Fig. 2와 같다.

외견상 콘크리트의 투수계수를  $k_s$ , 차수벽의 두께를  $t_s$ , 동수경사를  $i$ , 미소면적을  $\delta A$ 라 할 때, 미소면적을 통해 흐르는 미소유량은 다음과 같다.

$$\delta Q = \delta A k_s i \quad (1)$$

만약 미소면적의 경사 길이를  $\delta s$  라 하고, 차수벽을 가로지르는 길이를  $l$ 이라 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta A = l \delta s \quad (2)$$

저수지의 수심을  $H$ 로 하고, 바닥으로부터의 높이를  $h$  라 하면, 차수벽의 두께  $t_s$  는 다음과 같다.

$$i = \frac{(H - h)}{t_s} \quad (3)$$

$$\delta Q = l \delta s k_s \frac{H - h}{t_s} \quad (4)$$

차수벽의 경사를  $\theta$ 라 하면, 간편화한 모델에 대해, 각 요소의 길이  $l$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta s = \frac{\delta h}{\sin \theta}, \quad l = h \frac{H}{L} \quad (5)$$

또한, 만수시의 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l = h \frac{H_F}{L_F} \quad (6)$$

따라서, 
$$\delta Q = \frac{k_s L_F}{t_s H_F \sin \theta} (H - h) h \delta h \quad (7)$$

저수지를  $H$  까지 채웠을 때, 차수벽의 누수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_H = \frac{k_s L_F}{H_F t_s \sin \theta} \int_0^H (Hh - h^2) dh \quad (8)$$

일반적인 경우 수심에 따라 차수벽 두께는 증가하므로, 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$t_{sh} = m + n(H_F - h), \quad t_s = n(H_s - h) \quad (9)$$

여기서,  $H_s$ 는  $H_s = \frac{m + n H_F}{n}$  이다.

만약  $t_{sh}$  가 식(9)의  $t_s$  로 대체된다면,

$$Q_H = \frac{k_s L_F}{H_F \sin \theta n} \int_0^H \frac{(Hh - h^2)}{(H_s - h)} dh \quad (10)$$

임의의 깊이  $H$ 로 채워진 차수벽 두께에 대해서는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_H = \frac{k_s L_F}{6 H_F t_s \sin \theta} H^3 \quad (11)$$

댐마루부터의 거리에 따라 증가되는 차수벽 두께에 대해서는

$$Q_H = \frac{k_s L_F}{H_F t_s \sin \theta n} \left[ (H H_s - H_s^2) \text{Log}_e \left[ \frac{H_s}{H_s - H} \right] + H H_s - H^2/2 \right] \quad (12)$$

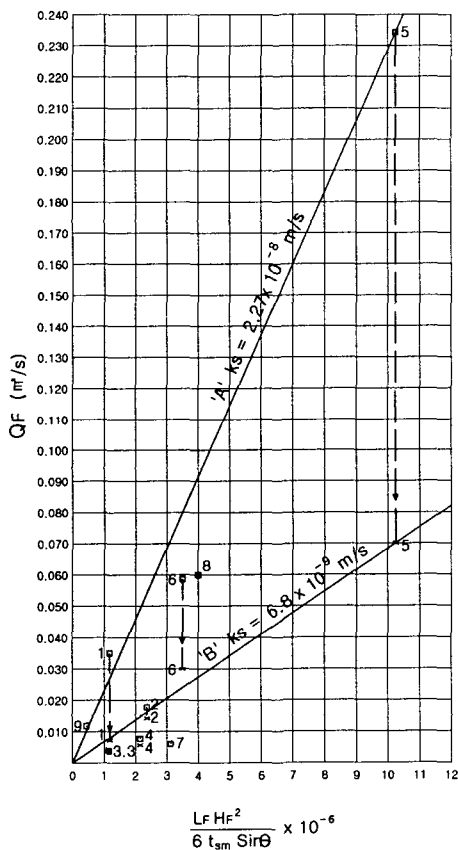
$t_s$ 를 차수벽 두께의 평균  $t_{sm}$ 이라 하고, 저수지 만수상태에서  $H = H_f$ 이므로, 이때 방류량  $Q_F$ 를 다음과 같이 추정한다.

$$Q_F = k_s \frac{L_F H_F^2}{6 t_{sm} \sin \theta} \quad (13)$$

상기 식을 이용하여 9개 CFRD로부터 외견상 투수계수  $k_s$  값을 얻은 결과는 Fig. 3과 같다.

여기서, 초기 누수의 적절한 상한 경계인 A선의 기울기는 외견상 투수계수  $2.27 \times 10^{-8}$  m/sec 값으로 대표되며, 이 값은 콘트리트 자체의 투수율보다 높게 나타났다. 또한, B선은 최종 누수량을 최적화한 선으로,  $6.8 \times 10^{-9}$  m/sce의 투수계수를 보이며 이는 A선의 값보다 3배정도 낮은 값을 나타낸다.

여기서, Murchison댐(1982년)과 Bastyan댐(1983년)의 초기와 최종의 누수량은 동일하고, 다른 댐에 비하여 그 값이 모두 작은 것으로 나타나는데, 이는 두 댐 모두 많은 경험을 가지고 최선의 기술을 사용하여 축조된 댐이기 때문이다. Kotmale댐(1985년)은 이용가능한 최종의 누수값이 없지만, 초기 누수값은 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 Kotmale댐은 보통의 경우처럼 철근을 중앙에 배근하지 않고 차수벽으로부터 일정한 간격으로 보강철근이 분산되도록 위치시켰기 때문에 측기 균열이 매우 작았고, 또한, 모든 균열을 에폭시 그라우팅으로 보수하였기 때문이다(Aphaiphuminart et al., 1988).



- 1) Cethana
- 2) Mackintoshi
- 3) Murchison
- 4) Bastyan
- 5) Foz do Areia
- 6) Winneke(Sugarloaf)
- 7) Kotmale
- 8) Salvajina
- 9) Boondooma

Upper number : Initial leakage

Lower number : Final or current leakage

Fig. 3 Apparent permeability method  
- Plot of data for existing dams

### 3. 누수특성 사례 고찰

상기 누수량 산정방법에 대한 적용성 검토를 위하여 외견상 투수계수를 이용하여 산정된 누수량과 국내·외 9개댐의 실측 누수량자료(Cooke 와 sherad, 1985; Matsumoto et al., 1985)를 비교한 결과는 Table. 1과 같다.

Table. 1 Apparent permeability method - Data for dams calibration

Name	Length (m)	Height (m)	Membrane thickness(m)		Concrete Facing		Seepage(m <sup>3</sup> /sec)			
			At crsset	At base	Area (m <sup>2</sup> )	Upstream Slope	Initial		Final or Current	
							Measure-ment	Estimation	Measure-ment	Estimation
Cirata	450	125	0.30	0.68		1.3	0.009	0.089		
Rouchain	230	60	0.35	0.60	16,000	1.4	0.250	0.011	0.013	0.003
R. D. Bailey	426	94.5	0.30	0.58	6,500	2.0	0.370	0.073	0.110	0.022
Kangaroo creek		59	0.30	0.60	8,000	1.3	0.014	0.013	0.001	0.004
Little Para		54	0.30	0.46	10,200	1.3	0.019	0.018		
Shiroro	560	130	0.30	0.69	50,000	1.3	1.900	0.119	0.100	0.036
Terror Lake	750	59	0.30	0.48		1.5	0.014	0.046		
Minase	140	66.5	0.30	0.60		1.35	0.220	0.009		
D dam	188	45	0.30	0.67		1.5	0.052	0.004	0.002	0.001

Table.1에서 알수 있듯이 과도한 누수량을 보이는 Shiroro댐을 제외하고도 초기 누수량 실측치는 0.009~0.370m<sup>3</sup>/sec의 범위를 나타내고 계산치는 0.004~0.089m<sup>3</sup>/sec로서 그 편차가 매우 커서 신뢰도가 매우 적은 것으로 알 수 있었다. 또한, 누수량 산정결과도 A선(Fig. 3)의 한계를 초과하는 댐도 다수 나타나고 있다. 이는 해당 댐에 일반적으로 발생하는 건조수축 균열이나 조인트를 통한 누수 이외에도 손상부위가 있어 이를 통한 누수량이 많았던 것으로 판단된다.

B선(Fig. 3)을 이용하여 산출한 최종 누수량 계산치와 실측치는 다소 차이를 보이고 있으나, 유지관리시 적용가능한 것으로 판단된다. 또한, 향후, 설계 및 시공기술이 발전하면 누수량에 영향을 미치는 인자들의 변화폭이 적어질 것이고, 많은 데이터가 축적되면 더욱 신뢰도가 높아져 외견상 투수계수를 이용한 CFRD의 누수량 산정방법은 유지관리시 누수에 대한 댐의 안정성여부를 판단할 수 있는 좋은 근거가 될 것으로 사료된다.

다음은 국내 D댐의 누수특성과 외견상 투수계수를 이용하여 누수에 대한 안정성을 검토한 결과이다.

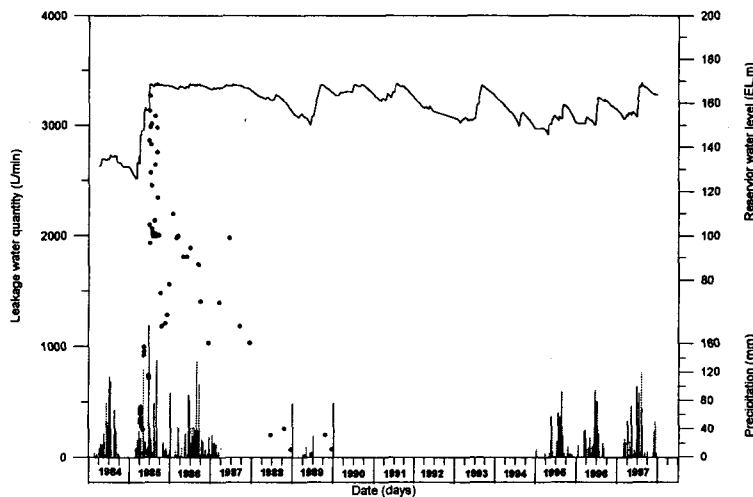


Fig. 4 Leakage observation with time

본댐의 경우, 댐체 하류단에 높이 2m의 옹벽을 설치하여 차수벽 또는 조인트를 통한 누수가 이곳으로 집중되며 여기서 누수량을 측정하도록 되어 있는바 설계 구조상 하류사면과 댐 좌우측사면에 내린 강우의 영향을 받게 되어있다. 그러나, 차수벽 담수전에 누수량을 측정한 결과 누수량이 없는 것으로 나타나 측정된 누수량은 기초지반을 통한 누수량이 배제된 결과로 판단된다. '90년도 이후로는 누수량측정장치의 고장으로 계측이 이루어지지 않았으나, 1999년 정밀안전진단 이후 보수되어 현재는 측정이 가능한 상태이다. Fig. 4는 본댐의 저수지 수위변화에 따른 누수량의 경시변화를 도시한 것이다.

본댐의 누수량은 Fig. 4에서 알 수 있듯이 '85년 6월 최초 담수시에 3,135 l/min(0.052m<sup>3</sup>/sec)을 최대 로 하여 점차 작아지는 것으로 나타났다. '86년 우기철에 다시 누수량이 커지나 이것은 강우의 영향을 받은 것으로 판단되며, 동절기에 측정된 것이 강우의 영향이 배제된 순수한 누수량이라 할 수 있다. '86년도 동절기에 측정된 결과치는 '85년도 동절기보다 작아지고, '87년도는 더욱 작아져 점차 누수량이 안정화되어 가는 경향을 나타내고 있다. 이는 앞에서 살펴본 Fig. 3이나 Table.1에서 나타난 결과와 같이 CFRD의 누수량은 초기 만수시가 가장 크고 그 이후 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

이런 현상은 Cethana댐의 사례(Wilkins et al., 1973)에서 알 수 있듯이 1)시멘트내의 석회성분이 균열 부위를 스스로 메움, 2)콘크리트의 신축이음이 포화되어 균열을 폐쇄, 3)압축이 커지므로 균열 폐쇄, 4)물속의 실트 또는 다른 물질이 조인트와 균열부위를 메움 등의 원인에 의하여 누수량이 감소하는 것으로 판단된다.

외견상 투수계수(Fig. 3)를 이용하여 본댐의 누수량을 계산한 결과, 최초담수시 누수량은 0.004m<sup>3</sup>/sec로 실측치 0.052m<sup>3</sup>/sec보다 매우 작게 산출되었으며, 최근 2003년 2월 실측 누수량은 0.0023m<sup>3</sup>/sec으로 나타나 산정된 누수량은 0.0012m<sup>3</sup>/sec보다 큰 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 CFRD의 누수량 측정자료를 분석하여 누수특성을 파악하였고, 외견상 투수성(Apparent permeability)에 의한 누수량 산정방법에 의한 누수량을 계산하여 실측치와 비교할 수 있는 기준치를 제시코자 하였으며, 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 CFRD에서 시간경과에 따른 누수특성을 분석한 결과, 누수량은 최초 담수시에 제일 크게 나타나고 그 이후부터 점차 적어지는 것을 확인하였으며, 이는 조인트와 균열부위가 다른 물질에 의하여 메워지거나 폐쇄되기 때문으로 판단된다.
- 2) 외견상 투수계수를 이용한 Casinader와 Rome(1988)의 누수량 측정방안을 국내외 댐의 누수자료를 이용하여 적용성을 검토한 결과, 최종 누수량은 유지관리시 관리기준치로 적용 가능한 것으로 판단된다.
- 3) 외견상 투수계수를 국내댐에 적용하여 누수량을 계산한 결과, 사례로든 D댐의 경우 산정된 누수량이 최근 실측 누수량보다 큰 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 향후, 이 방법은 설계 및 시공기술이 발전하여 누수량에 영향을 미치는 인자들의 변화폭이 적어지고, 많은 데이터가 축적되면 더욱 신뢰도가 높아져 유지관리시 이를 기준으로 누수에 대한 댐의 안정성여부를 판단할 수 있는 좋은 근거가 될 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부(2001), 댐설계기준, pp.257
2. J. B. Cooke and J. L. Sherad(1985), Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance, pp.88~97, pp.163~172, pp.208~230, pp.362~378.
3. J. K. Wilkins, W. R. Mitchell, M. D. Fitzpatrick and T. B. Liggins(1973), "The Design of Cethana Concrete Face Rockfill Dam", 11th International Congress on Large Dams(ICOLD), Q.42, R.3, Madrid, Spain, pp.25~43.
4. N. Matsumoto, M. Takahashi and F. Sato(1985), "Repairing the Concrete Facing of Minase Rockfill Dam", 15th ICOLD, Q.59, R.13, Lausanne, Swiss, pp.203~225.
5. R. Casinader and G. Rome(1988), "Estimation of Leakage through Upstream Concrete Facings of Rockfill Dams", 16th ICOLD, Q.61, R.17, San Francisco, USA, pp.283~309.
6. S. Aphaiphuminart, O. Chanpayom, T. Mahasandana, V. Bhucharoen and J. Pinrode(1988), "Design, Construction and Performance - Khao Laem Dam", 16th ICOLD, Q.61, R.6, San Francisco, USA, pp.95~113.