

네델란드 다기능 보의 운영 사례



황 필 선 |

한국수자원공사 물관리센터 실장
jesus@kwater.or.kr



김 현 식 |

한국수자원공사 물관리센터 물관리기획팀장
hyeonsik@kwater.or.kr



강 신 욱 |

한국수자원공사 물관리센터 선임연구원
sukang@kwater.or.kr

본류에 직렬로 연결되어 물을 담수하여 운영하는 것으로 계획되어 있다.

우리나라는 홍수기인 6월부터 9월까지 강수량이 연강수량의 약 2/3를 차지하고 있어서 이로 인한 하천 유출량 또한 이 기간에 집중되어 있다. 그러므로 미국이나 유럽처럼 유황이 점진적이지 않고 매우 급박하게 변화한다. 또한 신규 다기능 보들의 건설로 유역의 물관리는 현재보다 더욱 어려워질 것이며, 이를 관리하는 수자원관리자들의 임무는 더욱 막중해 질 것이다.

위와 같은 상황에서 본 고에서는 세계적 물관리 선진국인 네델란드의 다기능보 수문운영 사례를 소개하여 향후 과학적 다기능 보의 운영에 기여하고자 한다. 본 고에서는 먼저 네델란드로 유입하는 라인강의 수문현황을 알아보고, 네델란드 하류 라인강의 Driel, Amerongen, Hagestein 다기능 보와 운영방법을 소개한다. 이후에는 수집한 수문자료를 바탕으로 라인강에 큰 홍수가 있었던 1995년과 강수량이 적었던 2010년의 다기능보의 운영사례를 분석하였다.

1. 서론

2009년 10월부터 본격적으로 시작된 4대강살리기 사업은 한강, 낙동강, 금강, 영산강에 16 개 다기능 보 건설을 포함하고 있다. 이 다기능 보들이 완공되면 평상시 풍부한 하천유지용수 공급, 가뭄시 용수 활용, 지하수위 유지, 강변경관 및 수상활동에 필요한 수면 및 수심확보, 상·하류 수위차를 이용한 소수력발전 등에 이용할 계획이다. 각 수계별 다기능 보들은 상류에 각종 댐들이 위치하며 하천의

2. 라인강의 수문현황

라인강은 스위스 고타르(Gotthard) 산맥의 빙하에서 녹아내리는 물줄기를 수원으로 남에서 북으로



그림 1. 라인강의 유역도

흐르며, 길이는 약 1,320 km에 이른다. 그림 1에서 보는 바와 같이 라인강은 스위스, 독일, 네델란드 등 유럽 7 개국을 경유하여 북해로 흐른다. 유역면적은 185,000 km²로 남한 면적의 약 1.8배 정도이다. 네델란드에 속한 면적은 약 2,500 km²이다.

스위스 바젤까지 라인강 유량은 대부분 빙하와 융설에 의한 영향으로 봄철과 이른 여름에 수량이 많다. 독일을 거치면서 Neckar, Main, Moselle

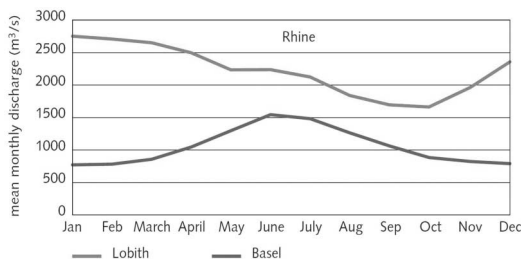


그림 2. 라인강의 Lobith와 Basel 지점의 월평균 유량분포(Rijkswaterstaat, 2007)

강과 같은 큰 지류와 합류한다. 이들 지류의 수량은 많은 부분이 겨울철 강수에 기인한다. 네델란드에 유입하는 수량 역시 겨울철에 많다. 네델란드의 주요 수위관측소중의 하나인 Lobith 지점은 네델란드와 독일의 국경에 위치하고 있으며, 연평균유량은 2,300 m³/s이다. 라인강의 월평균 유량의 분포는 그림 2와 같고, 연중 고른 유황으로 주운이 발달하였다.

라인강은 Lobith 하류 Waal에서 분기되고 전체 라인강의 수량중 약 70 %가 서쪽으로 흐르고 나머지는 IJssel에서 분기되어 약 12 %가 북해로 흐른다. 나머지 18 %는 Neder-Rijn(Lower Rhine)으로 흐른다(Gaay and Blokland, 1970).

3. Neder-Rijn강 다기능보 및 운영

3.1 Neder-Rijn강 다기능보

라인강은 그림 3에서 보는 바와 같이 네델란드와 독일의 국경을 가로질러 네델란드로 흐른다. 첫 번째 분기 지점은 Pannerdensch Kop이다. 라인강은 이 지점에서 Waal과 Neder-Rijn으로 흐르는 Pannendersch Kanaal로 나누어진다. 또다시 Arnhem에서 IJssel 강으로 분기된다. Neder-Rijn의 Driel 보는 라인강의 수량중 285 m³/s를 IJssel 강으로 보내고 25 m³/s를 Neder-Rijn으로 보내도록 운영된다(Rijkswaterstaat, 2011).

Neder-Rijn에 위치한 Driel, Amerongen, Hagestein 보는 그림 4와 같다. 최상류에 위치한 Driel은 라인강 상류로부터 891.2 km에 위치하고 Amerongen은 922 km, Hagestein은 946.6 km에 위치한다. Driel과 Amerongen 사이의 거리는 30.8 km, Amerongen과 Hagestein 사이는 24.6 km이다. 3 개의 보는 주운, 염수침입 방지 등을 목적으로 1970년대에 건설되었다. 3 개 보의 모양과 제원은 모두 유사하며, 단지 수문의 길이만 상이하

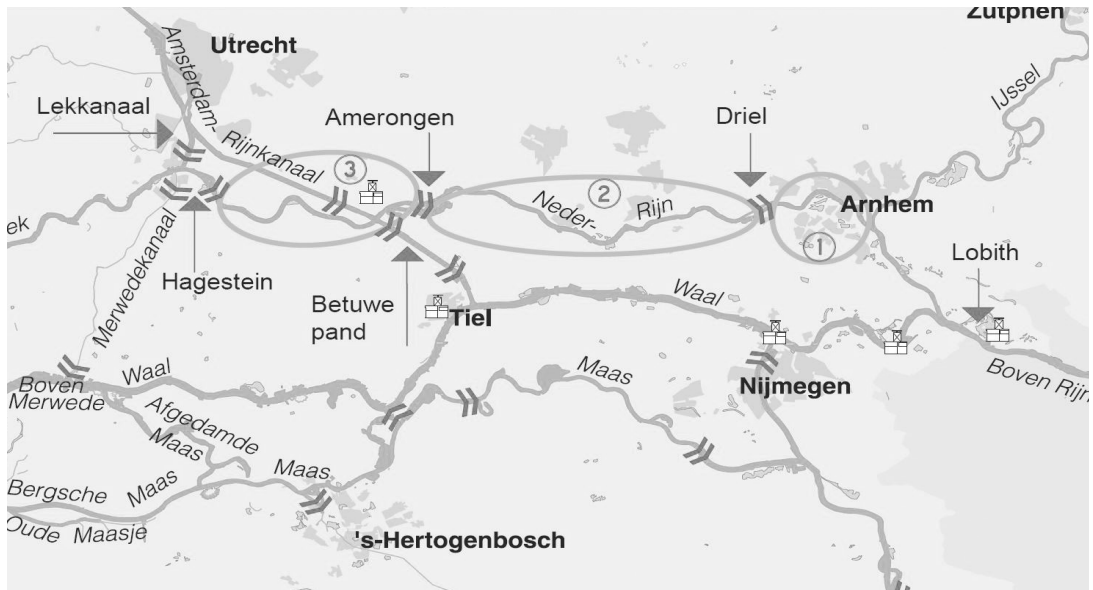
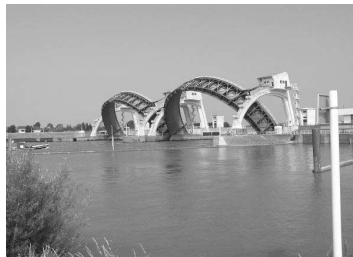


그림 3. Neder-Rijn 강의 하천도



(a) Driel



(b) Amerongen



(c) Hagestein

그림 4. Neder-Rijn 강의 다기능 보

다. 각 보의 전체길이 110 m이고, 폭 48 m의 아치형 가동수문 2 기로 구성되어 있다. 부속시설로 주운용 갑살 1기와 사다리형 어도가 설치되어 있다. 2기의 수문사이에 수력발전기가 설치되어 있다.

3.2 Neder-Rijn강 다기능보의 운영

네델란드 내 라인강의 물관리 시스템으로 SOBEKRE 1D 모형이 구축되어져 있다. Deltares 사에 의해 개발된 SOBEK 프로그램은 하천과 운하 그리고 관거시스템을 전체적으로 연결하여 하천의 수자원 관리를 하는데 사용한다. 사용이 쉽고 편리하기 때문에 복잡한 하천 시스템을 모의하는데 이

용한다. SOBEK모형은 1 차원 흐름에 대한 지배방정식인 Saint Venant 방정식을 Preissmann box scheme을 사용하여 이산화하여 수치모의에 의해 해를 구한다. Sobek 모형의 흐름계산 모듈은 엇갈린 격자(staggered grid)를 사용한다. 각 노드(node)에서는 수위를 계산하고 노드와 노드를 연결하는 링크(reach)에서는 유량을 계산한다. 이와 같은 엇갈린 격자 시스템은 계산상 효율적인 것으로 알려져 있다(Stelling and Duinmeijer, 2003).

SOBEK 모형의 구성도는 그림 5와 같다. 상류 경계조건으로 Lobith 지점의 유량을 사용하고 하류 경계조건으로 수위-유량 관계식을 사용한다. 또한 보 지점의 내부경계조건으로 보 수문운영이 포

함된다. 보의 수문을 통한 유량은 자유흐름(식1)과 수중흐름(식2)으로 계산되며 각각의 관계식은 다음과 같다.

$$Q = c \cdot B \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot (h_1 - z)^3} \quad (1)$$

$$Q = c \cdot B \cdot (h_1 - z) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (2)$$

여기서 Q 는 유량, B 는 유효폭, c 는 유량계수, z 는 보의 월류수심, g 는 중력가속도, h_1 은 직상류의 수심, h_2 는 직하류의 수심이다.

4. 다기능 보 운영 사례

3.1절에서와 같이 라인강의 유량배분은 본류, IJssel 강, Neder-Rijn 강의 주운수심을 확보하기 위함이다. 더불어 IJssel 강에 위치한 화력발전소의 냉각수를 공급하며, IJsselmeer 호수에서 갈수 기간중에 북부 네델란드의 농업용수를 공급한다.

상기와 같은 유량배분 시나리오는 평균적으로 1년중 9개월은 유지된다. 그러나, 라인강 본류 Lobith 지점의 유량이 1,300 m³/s 이하이면 IJssel

강으로 285 m³/s를 직접 보내기 불가능하다. 그럼에도 불구하고 Neder-Rijn 쪽으로는 25m³/s를 보낸다. Lobith 지점의 유량이 1,300 m³/s 이상이면 Neder-Rijn의 Driel, Amerongen, Hagestein 보의 수문을 점진적으로 개방하여 유량을 증가시키고 IJssel 강으로는 지속적으로 285 m³/s가 유입되도록 한다. 라인강 본류 Lobith 지점의 유량이 2,400 m³/s 이상이면 보의 수문은 완전히 개방되어 유량의 인위적 배분은 불가능하게 된다. 직렬로 연결된 보의 평상시 유지수위는 암스테르담 평균수면 기준(NAP)으로 Driel이 8.3 m이고, Amerongen은 6.0 m, Hagestein은 3.0 m이다.

세 보의 운영 자료는 네델란드의 물관리기관인 Rijkswaterstaat의 홈페이지에서 1994년 10월 ~ 1995년 9월, 2009년 10월 ~ 2010년 9월까지의 자료를 수집하였다.

4.1 1995년 다기능보 운영

라인강의 1995년 홍수는 1월 20일부터 30일까지 유역전체에 많은 강수량으로 인해 발생하였다. 11일간 라인강에 내린 강수량은 1월 평균강수량의 2배에 이른다. 유역의 대부분 토양이 포화된 상태에서 이와

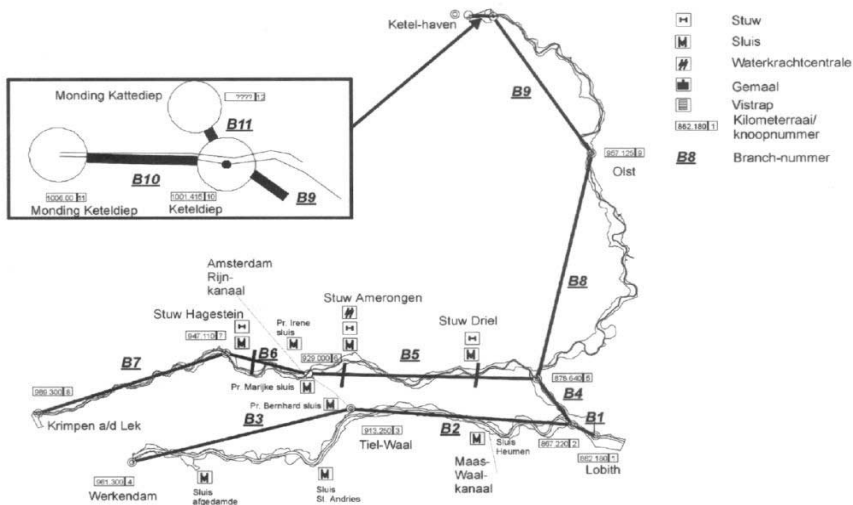


그림 5. 네델란드의 라인강 운영을 위한 SOBEK 모형 구성도(Veen, 2002)

같은 강수량으로 빠른 유출이 발생하였다. 이로인해 라인강 본류 주요 수위관측지점인 Lobith의 최대홍수량은 1월 31일에 12,000 m³/s이었으며, 이 양은 55년 빈도에 해당한다. Lobith 지점의 설계홍수량은 16,000 m³/s로 1,250년 빈도에 해당한다. Lobith 지점의 과거 최대홍수량은 1926년에 12,600 m³/s, 1993년에 11,100 m³/s이다(Partmet, 1997).

그림 6에 1994년 10월 ~ 1995년 9월까지 Lobith 지점, Neder-Rijn 구간 보의 직상류 및 직하류의 수위를 시간단위로 나타내었다. Lobith 지점의 유량에 따라 세 보의 수문조작이 동시에 이루어짐을 볼 수 있다. 수문년중 수문의 일부개방은 3개 사상이고 홍수기간 이후에는 세 보 모두 완전개

방후 일부개방이 이루어졌다.

첫 번째 수문의 일부개방은 1994년 11월 14일 ~ 12월 2일 사이에 이루어졌다. 이때 Lobith 지점의 유량은 1,300 m³/s를 초과하였다. 두 번째와 세 번째 수문의 일부개방은 1994년 12월에 이루어졌다. 세 보의 완전개방은 1994년 12월 29일부터 1995년 6월 21일까지 기간이며, 이후에는 일부개방으로 운영되었다. 이기간중 Lobith의 유량은 2,400 m³/s를 초과하였다.

4.2 2010년 다기능보 운영

그림 7에 2009년 10월 ~ 2010년 9월까지

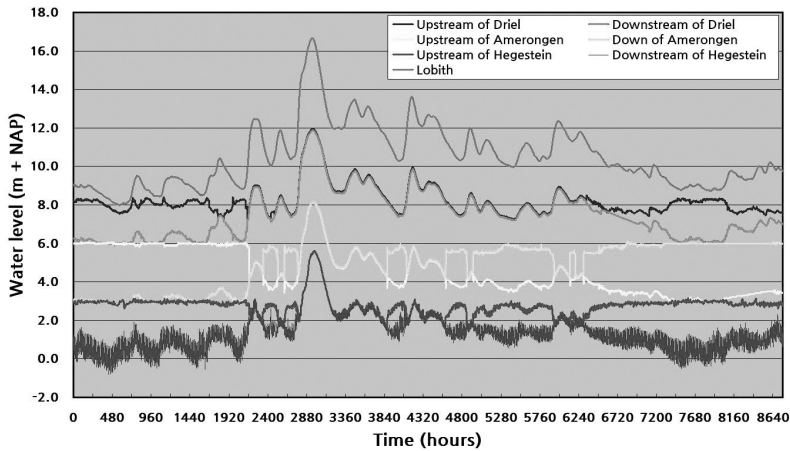


그림 6. 1994년 10월 ~ 1995년 9월의 다기능보 운영 수위

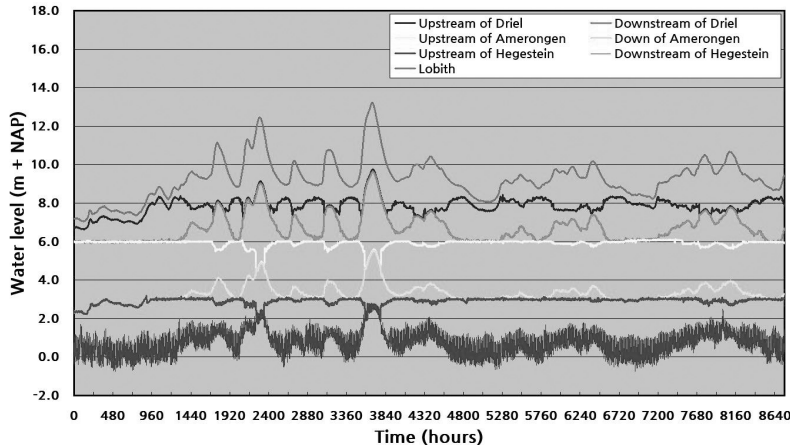


그림 7. 2009년 10월 ~ 2010년 9월의 다기능보 운영 수위

Lobith 지점 및 세 보의 직상류, 하류의 수위를 시간 단위로 나타내었다. 그림 6에서의 운영과 마찬가지로 이 기간 역시 세 보의 가동보 수문조작이 동시에 이루어짐을 볼 수 있다. 그림 7에서 보는 바와 같이 Lobith 지점의 수위수문곡선의 양상과 보의 방류량을 의미하는 직하류 수위 수문곡선의 양상이 같음을 볼 수 있다. Driel의 수문의 완전개방은 총 7회가 이루어졌고, Amerongen과 Hagestein은 총 2 회 이루어졌다. 일부 수문개방이 이루어진 기간에 Lobith 지점의 유량은 모두 1,300 m³/s 이상이고, 완전 개방이 이루어진 시기에는 모두 2,400 m³/s 이상이었다.

5. 결론

본 고에서는 세계적 물관리 선진국인 네델란드의 다기능보 운영 수문사례를 소개하였다. 네델란드의 다기능 보 건설목적은 주운과 염수침입방지 등이다. 이를 위해 직렬로 연결된 다기능 보의 운영은 라인강 본류 Lobith 지점 유량에 따라 평상시 각 보의 유지수위를 유지하다가 홍수시 점진적으로 개

방하여 일정 유량을 초과하면 완전개방한 후 기준 유량이하로 하강시에 점진적으로 수문을 닫아 평상시 수위를 유지한다.

네델란드의 다기능 보 운영을 위한 기준은 Lobith 지점 유량이다. 이 지점은 라인강이 네델란드로 유입하는 최상류 지점이며, 라인강 하류의 상황을 대표하는 지점이다. 우리나라의 경우 건설되고 있는 다기능 보들은 상류에 다목적댐들이 위치하고 있다. 평수기 및 홍수기에 이들의 방류량은 하천흐름 양상에 많은 영향을 미친다. 그러므로 건설되고 있는 다기능 보의 운영을 위해서는 상류댐 운영에 따라 유기적으로 운영될 수 있는 과학적 운영방법이 필요하다.

네델란드의 보와 현재 우리나라에서 건설되고 있는 다기능 보의 건설목적은 다르지만 기본적인 운영방법이 같은 수자원시설물이라고 사료된다. 본고에서 소개한 물관리 선진국의 다기능 보 수문운영 사례 등을 고려하여 우리나라 유역물관리 실정에 맞고, 상류댐과 유기적으로 연계하는 과학적 다기능 보 운영방안이 마련되고 있다. 🌀

참고문헌

1. Gaay, A.C. and Blokland, P. (1970). *The Canalization of the Lower Rhine*. Rijkswaterstaat communications Nr 10.
2. Parmet, B. (1997). "Rhine and Meuse Floods of 1995- how predictable are water levels in The Netherlands?" *Proceedings Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control*, Anaheim, IAHS Pub. No. 239. pp. 183-191.
3. Rijkswaterstaat (2007). *2 Rivers Rhine and Meuse*.
4. Rijkswaterstaat (2011). *Water management in the Netherlands*.
5. Stelling, G.S. and Duinmeijer, S.P.A. (2003). "A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows." *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, vol. 43, Issue 12, pp. 1329-1354.
6. Veen, R. (2002). *Bouw en calibratie Sobek-Rijn*. RIZA (in Dutch).