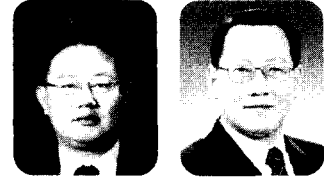


남한강 유역의 홍수대처 방안



김 경 덕 | 과장, 한국시설안전기술공단 진단2본부 댐항만실 / kkd@kistec.or.kr

신 은 우 | 본부장, 한국시설안전기술공단 진단2본부 / ewshin@kistec.or.kr

1. 서언

한강유역은 유역면적 26,218.90km², 유로연장 469.70km인 국내 최대하천으로 팔당댐 하류부에 수도권이 위치하여 홍수가 발생하게 되면 그 피해가 막대하며, 인명 및 재산피해가 해마다 증가하고 있는 추세이다. 한강유역은 상류하천의 경우 급경사를 이루고 하계에 강우가 집중하여 홍수조절에 매우 불리함은 주지의 사실이다. 그러나 홍수조절 능력을 갖춘 기존 댐은 화천댐, 소양강댐, 충주댐 등 3곳 뿐이고, 더

욱이 남한강 유역은 충주댐 한 곳으로 홍수조절을 감당하기 때문에 한강유역의 홍수방재 대책에 만전을 기하기에는 어려움이 많다. 한강수계의 기존댐들은 청평, 화천댐 등을 필두로 하여 단계적으로 건설되어(청평, 1943; 화천, 1944; 춘천, 1965; 의암, 1967; 소양, 1973; 팔당, 1974; 충주, 1986; 평화의 댐, 1988) 저수지군을 이루고 있다(그림 1 참조). 그런데, 장기·종합적인 계획에 따라 기존의 모든 댐이 건설된 것이 아니고 목적별로 건설되어 설계홍수량의 빈도가 각기 다르며, 건설당시 산정된 계획홍수량도 최근에 건설

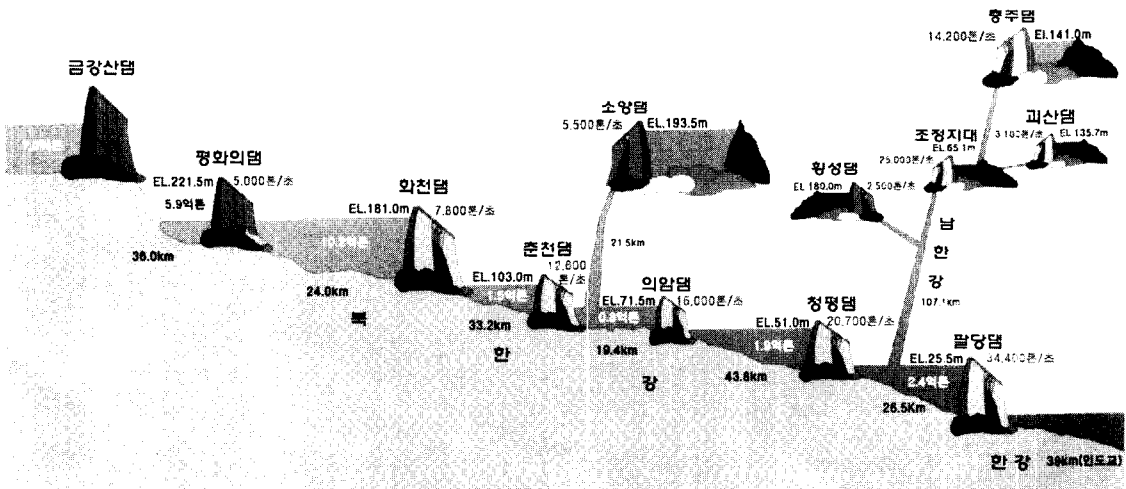


그림 1. 한강수계 댐 모식도

되거나 계획 중인 댐의 경우와 그 기준이 다르다.

최근 산업화와 도시화에 따라 화석연료의 사용이 급증하여 CO² 등의 기체가 증가함으로써 지구의 온실 효과가 발생하고 엘니뇨와 라니냐의 영향으로 이상기후가 빈발하고 있다. 특히, 최근에 들어 집중호우가 대규모로 자주 발생하고 있는 실정이며, 1996년의 경우 철원읍의 3일 연속 강우량이 736mm를 기록하여 과거 최고치를 갱신하였고, 1998년 호우는 계절라성 집중호우로 기존의 강우기록을 갱신하는 기록적인 호우였다. 또한, 1999년 집중호우시 파주지역은 4일 동안(7. 31~8. 3) 전국 연평균 강수량의 70%에 해당하는 900mm의 강우가 내려 계속 최고치를 갱신하고 있는 실정이다.

2002년에 전세계 80여 개국에서 홍수가 발생했으며, 이로 인해 1천 700여만 명이 피해를 당한 것으로 세계기상기구(WMO)가 보고하고 있다. 또한, 홍수로 인한 사망자만 약 3천명에 달하고 있으며 재산 손실도 300억 달러가 넘는 것으로 추산됐다. 홍수에 의한 침수지역은 미국 대륙의 면적과 엇비슷한 8백여만km²로 집계되었다. 국내에서는 8월 초 전국적인 홍수뿐 아니라 태풍 루사에 의해 가능최대강수량(probable maximum precipitation; PMP)에 육박하는 홍수가 발생하였다.

본 고에서는 극한홍수에 대한 한강유역의 방어능력을 평가하였으며, 취약한 남한강유역에 대한 홍수방어 대책을 강구하고자 하였다. 다시 말하면, 대규모 다목적댐에 있어서 매우 불리한 조건인 2002년 8월 초 홍수에 대하여 가상적인 댐 초기조건을 가정하고 한강유역의 댐들이 과연 안전한가를 진단하였으며, 이에 대한 대책을 마련하고자 한다.

2. 2002년 8월 홍수

제 12호 태풍(간부리)이 열대성 저기압으로 바뀌어 한반도 내륙에 형성된 강우전선과 만나 중부지방과 남부지방을 오가며 전국적으로 많은 강우를 내렸으며, 소양강 365mm, 충주 441mm, 황성 428mm가 내렸다. 이로 인해 댐저수율은 42.3%에서 76.4%로

상승하였다. 소양강댐은 수문방류 없이 홍수유입량을 저류(저류량 6.5억m³)하였으며, 충주댐은 최대유입량 20,437m³/s에 대하여 최대방류량 7,000m³/s를 방류함으로써 홍수조절에 기여하였다.

한강과 같은 주요 하천의 경우, 지천 주변의 일부 지역이 침수되긴 했으나 본류가 범람하는 등의 대형 피해없이 이재민 2,782명을 기록하였다. 1998년 경기·충청권 중심의 호우와 1990년 서울 등 중부권 폭우 때 이재민만 각각 2만 4,500명 및 18만 7,200명이 발생했던 데 비하면 경미한 수준에 속한다. 이는 태풍으로 인한 강수량은 엄청나게 많았지만 국부지역을 폭격하듯 강타한 집중형 폭우가 아니라 사나흘에 걸친 분산 강우였던 것이 큰 이유일 것이다. 그러나 결정적 역할은 소양강댐 및 충주댐처럼 홍수조절을 위해 건설된 다목적댐들이 해냈다는 분석이다.

한편, 태풍 루사의 경우, 한강 일대가 태풍의 왼쪽에 위치해 비와 바람 피해가 비교적 적었으며, 습윤한 공기 때문에 큰 비가 내린 영동지역에 비해 영서지역은 공기도 건조해 강수량이 적었다. 8월 30일 0시부터 1일 낮 12시까지 한강 일대에 내린 비는 한강 본류(행주대교~팔당댐) 52.5mm, 북한강(팔당댐~화천댐) 91.4mm, 남한강(팔당댐~충주댐) 139mm였다. 한강 일대에 홍수경보가 내려졌던 8월 초의 서울의 강수량 350mm와 비교하면 비의 절대량이 적었다. 태풍 루사가 지나갈 때 서울의 최대 풍속은 초속 20.5m, 수원은 27.3m로, 제주 고산 56.7m에 비해 매우 약했다.

3. 과연 한강수계 댐은 홍수에 안전한가?

앞서 기술한 바와 같이 이번 홍수에 대하여 한강유역은 비교적 안전하게 대처할 수 있었다. 그런데, 여기서 주목할 대목이 있는데, 홍수조절능력이 큰 소양강댐과 충주댐의 강우시작 전 초기 저수위이다. 그림 2는 소양강댐의 유입량, 방류량, 댐저수위를 나타내며, 그림 3은 충주댐을 나타내고 있다. 그림 2와 3에서 보듯이 점선으로 표시하고 있는 댐저수위는 8월 초순까지 하계 제한수위에 각각 20m 이상 못 미치는

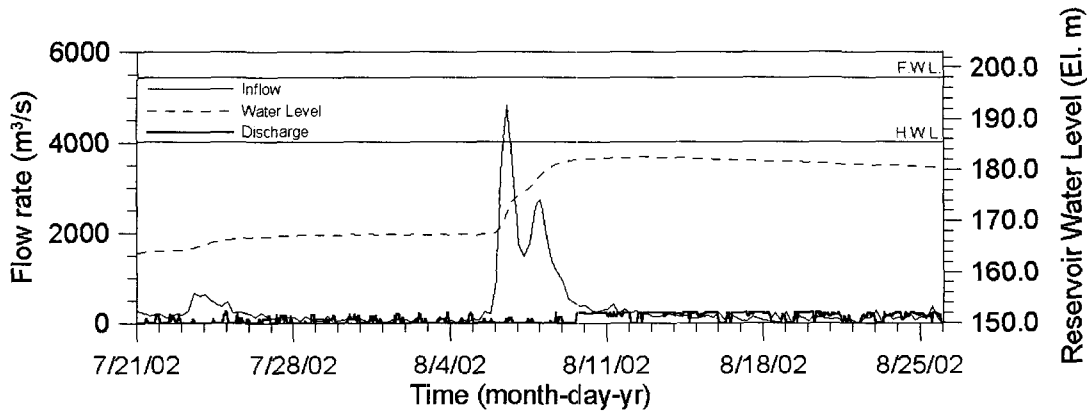


그림 2. 소양강댐 수문곡선

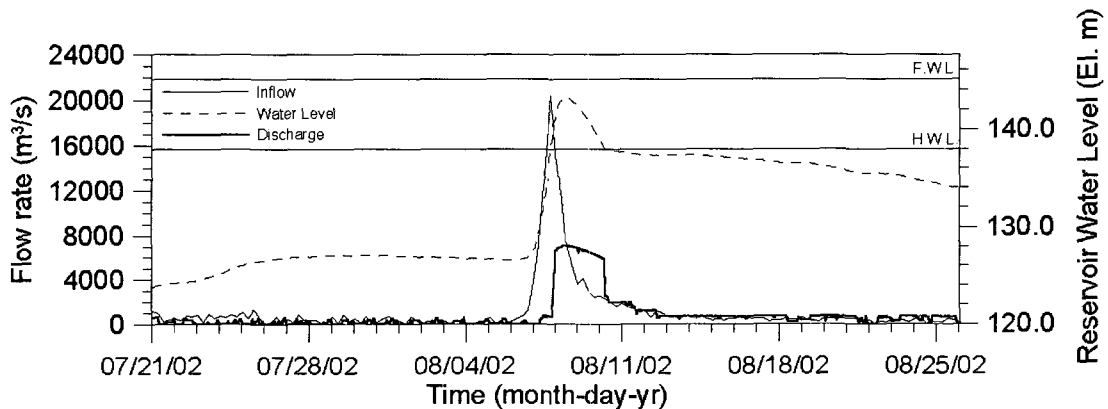


그림 3. 충주댐 수문곡선

상태였다. 또한, 8월 홍수이전에 토양이 메말라 있는 건조한 상태였다.

이러한 초기 댐수위와 토양상태는 앞에서 다목적댐의 역할을 극대화하여 금번 홍수에 잘 대처할 수 있는 원인이라 할 수 있다. 그러나 만일 초기수위가 제한수위에 위치하고 있었고, 토양이 충분히 수분함양된 상태였다면 어땠을까? 이러한 가정은 충분히 가능한 조건이다. 댐 입장에서 물은 돈과도 같다. 따라서 법적으로 제한하는 제한수위까지는 목표수위로 하여 최대한 채우려한다. 또한, 8월 홍수와 같이 큰 홍수후에 댐수위가 제한수위에 거의 육박한 상태에서 또 다른 홍수, 예를 들면 태풍 루사와 같이 연이어 홍수가 발생할 경우 이러한 가정은 여지없이 현실화된다. 선행

강수로 인하여 토양은 충분히 수분을 함양하고 있어 강우발생시 즉각적으로 유출에 기여할 것이다. 여기에다 댐저수위가 제한수위에 육박하는 상황이므로 홍수조절공간도 부족하게 된다. 따라서 앞서 분석된 바와 같이 다목적댐이 홍수조절을 원활하게 할 수 있는 지는 의문이 갈 수밖에 없다.

따라서 원칙적으로 댐 설계나 정밀안전진단은 토양 조건이 충분히 수분으로 포화되어 있으며, 초기 댐수위는 제한수위로 가정하는 가장 악조건에서 해석하게 된다. 본 고에서는 8월초 호우가 토양조건이 충분히 수분으로 포화되어 있으며, 초기 댐수위는 제한수위인 경우에 발생하였을 때, 하루부 홍수효과는 어땠을지를 분석하고 한강수계 댐들이 과연 안전한지 검

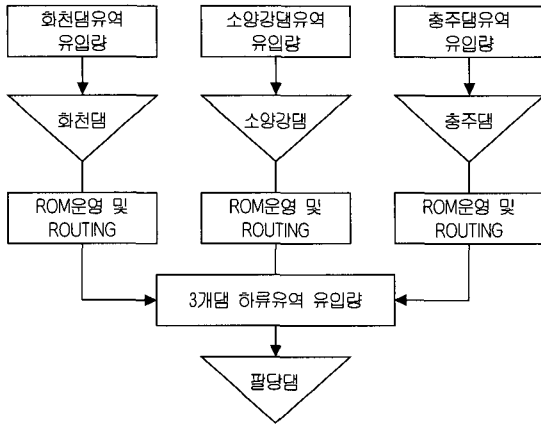


그림 4. 홍수해석 모식도

토하였다. 이를 위해서 한강홍수유출 시스템의 특성 자료 분석을 선행하고 HEC-1 모형을 검증하기 위해 한강수계내 22개 소유역과 13개의 하도추적 구간으로 설정하는 한편, 상류에 위치한 화천댐, 소양강댐 및 충주댐의 방류량은 상류단 유입량을 입력하여 유역추적 및 하도추적을 실시하였다. 이들 4개 중유역에 대한 홍수해석 모식도는 그림 4와 같다.

강우시작 전 초기수위를 제한수위에 위치시키고 해석한 결과 소양강댐은 전혀 문제가 없는 것으로 나타났다. 이는 금번 홍수가 소양강 유역내 강우량이 비교적 적고, 유역면적에 비하여 댐 저수용량이 크기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 충주댐의 경우 초기저수위를 제

한수위에 위치시킨 상태에서 금번 호우가 발생하면 그림 5와 같은 결과를 얻는 것으로 모의되었다. 그림 5에서 Inflow는 충주댐으로의 실제 유입량을 나타내고 있다. Water Level(scenario)과 Discharge(scenario)는 강우시작 전 초기수위를 충주댐 제한수위에 위치시켰을 경우 댐계획 홍수위를 초과하지 않도록 방류하였을 경우의 수위와 유량을 나타내고 있으며, Water Level(real)과 Discharge(real)는 금번 방류실적으로 댐운동을 하였을 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. 이에 대한 모의결과를 살펴보면, 첫 번째, 현실적으로는 계획홍수위를 초과하는 상태에서 금번 방류실적과 동일하게 댐운동을 수행하지 않겠지만 금번 호우시 댐운영과 동일하게 방류하는 경우, 그림 5와 같이 약 1m 이상 월류하는 것으로 나타났다. 두 번째로 댐체 안전을 위한 정상적인 댐운동을 실시하는 경우, 즉 계획홍수위를 초과하지 않기 위한 댐운동을 수행하는 경우 그림 5에서 보는 바와 같이 많은 양을 방류해야 하는 것으로 나타났다. 이는 충주댐 유역내에 많은 강우량이 발생하였으며, 충주댐 유역면적이 소양강댐 유역면적에 약 3배 가깝는데 반하여 저수용량은 소양강댐과 거의 비슷하기 때문에 홍수방어능력이 현저히 작기 때문일 것이다.

4. 남한강유역 충주댐 홍수방어능력 평가

최근의 수문기상학적 변화와 더불어 기존댐이 건설

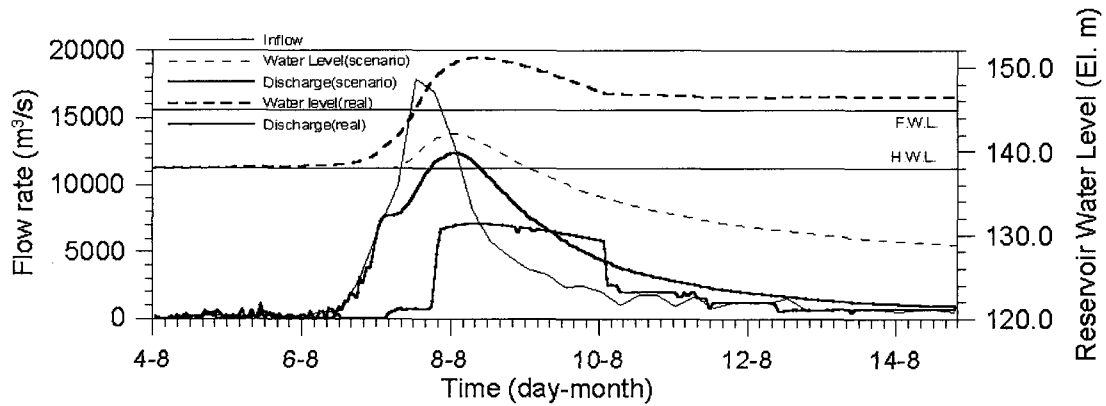


그림 5. 충주댐의 모의결과

당시 제한된 수문자료에 개략적인 경험적 기법을 적용하여 설계가 되었으므로 현재의 시점에서 관측자료의 누적에 따른 수문자료의 확충과 발전된 해석기법을 기반으로 기존댐의 수문량을 평가하는 것은 댐 정밀안전진단에 있어서 매우 중요하다.

한강유역은 국내의 최대하천으로 홍수가 발생하게 되면 그 피해가 막대하나 홍수조절 능력을 갖춘 기존댐은 화천댐, 소양강댐, 충주댐 등 3곳뿐이고, 더욱이 남한강유역은 충주댐 한 곳으로 홍수조절을 감당해야 하기 때문에 한강유역의 홍수방재 대책에 만전을 기하기에는 어려움이 많다. 이처럼 충주댐이 한강수계에 미치는 영향이 크고, 최근 강우사상의 분포 양상을 볼 때 강우의 시·공간적 분포를 합리적 방법으로 다각화할 필요가 있다. 이러한 이유로 본 고에서는 강우를 시·공간적으로 분배함에 있어 한강유역 전체를 영향권으로 보고 충주댐의 홍수방어능력을 평가하였다.

가능최대홍수량 및 빈도 홍수량에 대한 충주댐의 홍수방어능력을 검토한 결과 충주댐 100년 빈도홍수량은 26,923m³/s, 200년 빈도홍수량은 29,938m³/s, PMF는 46,893m³/s로 산정되었으며, 설계당시와 비교할 때 200년 빈도홍수량은 약 87% 정도, PMF는 약 76% 정도 증가되었다(한국시설안전기술공단, 2002). 100년, 200년 빈도 확률홍수량에 의해 충주댐이 월류하는 경우는 발생하지 않았으나, 설계

방류량을 초과하여 방류하더라도 계획홍수위를 초과하는 것으로 나타났다. 한편, PMF의 경우에는 댐 최고수위가 150.31m로 댐마루 높이 EL. 148.0m를 초과하여 충주댐을 월류하는 것으로 나타났다.

본 고에서 산정된 PMF의 경우에 충주댐의 부족한 홍수방어능력을 개선하기 위해서는 제한수위 변경, 댐 운영방식 조정 등 비구조적인 대책과 댐 증고, 비상 여수로 및 기존 여수로 규모 확장 등을 통한 하류부 방류량 증대, 상류댐 건설 등의 구조적인 대책이 있을 수 있다.

첫 번째로 비구조적 대책인 제한수위 변경과 댐 운영방식 변경을 검토해 본 결과 2차 정밀안전진단에서 산정한 PMF에 대해서는 댐 월류가 불가피한 것으로 나타났다. 이는 설계당시보다 훨씬 큰 홍수량이 유입되어 비구조적인 대책으로는 댐월류가 불가피한 상황이다.

두 번째로 구조적인 대책 중 가배수 터널에 수문을 설치하여 재이용하는 방안을 검토하였다. 유수전환용 가배수터널은 현재 40m의 콘크리트블록으로 폐쇄되어 있으며, 비상방류터널로 이용하기 위해서는 수문을 설치하여 조절할 필요가 있다. 금회 검토에서는 가배수터널에 수문을 설치하여 PMF 유입시 저수지 수위 EL. 138.0m부터 방류한다는 가정하에 저수지 추적을 실시하였다. 충주댐 가배수터널의 제원은 다음과 같다.

표 1. 홍수량 비교

| 구 분 | 홍수규모(cms) | | | 비 고 |
|-----------------------------|-----------|--------|--------|-----|
| | 100년 | 200년 | PMF | |
| 설계시 | - | 16,000 | 26,680 | |
| 1차 정밀안전진단(시설안전기술공단, 1997) | - | 21,490 | 32,740 | |
| 2차 정밀안전진단(한국시설안전기술공단, 2002) | 26,923 | 29,938 | 46,893 | |

표 2. 저수지 홍수추적 결과 비교표

| 구 분 | 100년 | | 200년 | | PMF | | 비 고 |
|-----|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------------------------------|
| | 최대방류량(cms) | 최고수위(m) | 최대방류량(cms) | 최고수위(m) | 최대방류량(cms) | 최고수위(m) | |
| 설계시 | - | - | 14,200 | 144.70 | 20,155 | 148.00 | Spillway Rule Curve |
| 1차 | - | - | 17,015 | 145.75 | 19,533 | 147.53 | " |
| 2차 | 19,275 | 147.37 | 20,134 | 147.99 | 25,437 | 150.31 | 100년, 200년 : SRC PMF : Auto ROM |

- ▶ 터널직경 : 12m
- ▶ 터널길이 : No 1. 601m
No 2. 666m
- ▶ 터널개수 : 2개
- ▶ 터널표고 : 입구, EL. 64.5m
출구, EL. 62.5m
- ▶ 터널경사 : No 1. 1/300
No 2. 1/333

가배수 터널에 수문을 설치하여 저수지 수위가 EL. 138.0m부터 주여수로와 연계하여 방류할 경우 저수지 수위는 EL. 147.72m까지 상승하는 것으로 검토되었으며, 이 때의 최대방류량은 27,713m³/s인 것으로 나타났다. 충주댐의 가배수터널은 현재 40m 두께의 콘크리트 블록으로 폐쇄되어 있다. 따라서, 가배수 터널을 다시 이용하기 위해서는 폐쇄공을 철거하고, 수문을 설치해야 한다. 이를 위해서 저수지수위를 EL. 64.5m 까지 낮추어야 하는 문제가 발생하며, 직경 12m의 터널에 수문을 설치하는 것 또한 문제가 될 수 있다.

세 번째로 충주댐체에 비상 배수터널을 시공하는 방안을 검토하였다. 댐체에 방류관을 설치하는 경우는 일반적으로 하천유지용수 등을 상시적으로 공급할 목적으로 설치하게 된다. 충주댐의 경우에는 여수로 하단에 방류관이 있으나 그 규모가 작아 홍수시에는 큰 역할을 할 수가 없다. 국내에서 댐체에 터널을 시공하여 비상배수로로 사용한 경우는 평화의 댐 건설

당시 화천댐의 수위를 낮출 목적으로 내경 5m의 터널 5개를 댐체에 시공한 사례가 있다.

비상방류터널의 위치는 현재 방류터널(river outlet) 바닥이 EL. 84.5m에 설치되어 있으므로 이 보다 아래에는 설치가 어렵다. 또한, 비상방류터널이 Pier 아래에 설치되므로 Pier 하단부보다 낮아야 한다. 따라서, 방류터널의 입구 상단표고는 여수로 및 피어부의 돌출부아래인 EL. 114.5m에 위치하며, 출구는 입구와 19m의 표고차를 가지도록 가정하였다. 검토한 방류터널의 제원은 다음과 같다.

- ▶ 터널 개수 : 5개
- ▶ 터널 폭 : 6m
- ▶ 터널 높이 : 7m
- ▶ 입구바닥표고 : 107.5m
- ▶ 출구바닥표고 : 88.5
- ▶ 조도계수 : 0.014(콘크리트)
- ▶ 유입구 손실수두계수 : 0.23
- ▶ 수문에의한 손실수두계수 : 0.1

방류터널내의 평균유속을 V라하면 방류에 소요되는 전수두 H_T는 식 (1)과 같다.

$$H_T = h_e + h_f + h_g + h_v$$

$$= \frac{V^2}{2g} \left[f_e + \frac{2gn^2}{R^{1/3}} \frac{L}{R} + f_g + 1 \right] = C \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

따라서 방류터널을 흐르는 총유량은

표 3. 충주댐 댐체의 비상배수터널의 수위-방류량 관계

| HT(m) | R.W.L.(EL. m) | Q(m ³ /s) |
|-------|---------------|----------------------|
| 41.00 | 137.0 | 5,030 |
| 42.00 | 138.0 | 5,091 |
| 43.50 | 139.5 | 5,181 |
| 44.00 | 140.0 | 5,210 |
| 45.00 | 141.0 | 5,269 |
| 46.00 | 142.0 | 5,327 |
| 47.00 | 143.0 | 5,385 |
| 48.00 | 144.0 | 5,442 |
| 49.00 | 145.0 | 5,498 |
| 50.00 | 146.0 | 5,554 |
| 51.00 | 147.0 | 5,609 |
| 52.00 | 148.0 | 5,664 |

$$Q = n \times A \sqrt{2gHr/C} \quad (2)$$

댐체에 비상방류터널을 설치하여 저수지 수위가 EL. 138.0m부터 주여수로와 연계하여 방류할 경우 저수지 수위는 EL. 147.81m까지 상승되고, 최대방류량은 27,765m³/s인 것으로 나타났다.

네 번째로 기존댐을 증고시키는 방안을 검토하였다. 수위 상승에 따라 월류수면과 수문 최대권양시의 수문 하단과의 이격 거리를 검토할 필요가 있다. 이격 거리가 없는 경우는 오리피스 흐름이 되어 자유수면을 갖는 흐름보다도 유량이 감소하게 된다. 또한, 이 경우는 여수로 수문의 안전에도 영향을 주게 된다. 현재 충주댐 여수로 수문하단의 최대 높이는 Sill 표고 EL. 125.6m에 최대 권양높이 18m를 더하면 EL. 143.6m가 된다. 검토결과 저수지 수위가 EL. 148.0m 이하에서는 월류수면이 수문하단보다 낮으나, 그 이상의 수위에서는 월류수면이 수문하단보다 높은 것으로 검토되었다. 따라서, 급회 검토에서는 여수로의 구조변경없이 비월류부만을 증고하는 방안과 여수로의 구조변경을 실시하여 월류수면과 수문하단과의 이격거리가 충분하다는 조건에 대하여 각각 필요한 댐증고 높이를 산정하였다. 산정된 여수로 용량을 감안하여 저수지 추적을 실시하여 필요한 댐증고 높이를 산정하였다. 두 가지 경우에 대한 저수지 추적결과와 댐 증고 높이는 표 4와 같다.

댐증고 방안은 여유고를 고려하지 않더라도 최소한 2.94m 이상 증고해야 하는데, 상류부 수몰지역에 대한 대책이 마련되어야 할 것이다.

다섯 번째로 남한강 본류 주변지역의 홍수조절용량 확보와 충주댐의 홍수방어능력 개선을 위하여 충

주댐 상류에 신규댐을 가상하여 충주댐과 연계운영하는 방안을 검토하였다. 검토 결과 충주댐의 최고수위가 댐마루 표고 EL. 148.0m를 넘지 않기 위해서는 상류에 총저수용량 약 9.4억톤 정도의 신규댐이 필요한 것으로 검토되었으며, 이 경우 충주댐의 침투 유입량이 35,917m³/s이었고 침투 방류량이 21,744m³/s인 것으로 산정되었다.

4. 결론

이상에서 2002년 8월에 발생한 호우의 특징을 분석하고 가상적인 조건에서 한강유역의 댐이 과연 홍수로부터 안전한가를 진단하였다.

금번 낙동강 수계와 강릉지역에서의 막대한 홍수피해와는 달리 한강수계는 앞서 지적한 바대로 여러 가지 요인으로 인하여 홍수피해가 비교적 적게 나타났다. 그러나, 한계조건에서 발생한 호우는 아니기에 앞으로 심각한 홍수위기에 노출될 수 있다는 것을 명심해야 할 것이다.

한편, 홍수조절용량을 유역면적으로 나눈 유역비 홍수량이 북한강 수계의 경우 70.3mm, 남한강 수계의 경우 48.2mm로 「하천설계기준(건설교통부, 2000)」의 홍수방어계획에서 제시한 100mm 이상이 바람직한 점을 고려할 때 모두 이 수치에 미달하고 있지만 남한강 수계가 상대적으로 낮은 수준임을 알 수 있다. 급속한 산업화와 도시화, 기상이변 등으로 작은 규모의 홍수에도 피해는 계속 증가하는 추세에 있고 특히, 남한강은 북한강보다 유역이 넓어 홍수량이 더 많기 때문에 충주댐만으로 홍수조절이 어려운 실정이므로 상류의 신규 댐 건설을 적극 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

표 4. 충주댐 댐증고 높이

| 구 분 | 초기수위(EL.m) | 최고수위(EL.m) | 증고높이(m) | 최대방류량(m ³ /s) | 비 고 |
|------|------------|------------|---------|--------------------------|----------------------|
| (1)안 | 138 | 150.92 | 3.42 | 21,792 | 기존댐마루높이 : EL. 147.5m |
| (2)안 | 138 | 150.44 | 2.94 | 24,449 | |

참/고/문/헌

건설교통부(2000), 하천설계기준.
 시설안전기술공단(1997), 제1차 충주댐 정밀안전진단 보고서.

한국시설안전기술공단(2002), 제2차 충주댐 정밀안전진단 보고서.