

02

2017년 국제대댐회 기술동향

신동훈 소장 : K-water융합연구원



1. 서언

1928년 창립된 국제대댐회 (International Commissions on Large Dams, 이하 ICOLD)는 2017년 7월 체코의 프라하에서 제85차 연차회의(annual meeting)를 개최하였고, 앙골라, 아프가니스탄과 부탄의 3개국이 가입하여 총 100개 회원국, 개인국제회원 1만 명 이상이 활동하는 댐의 설계, 시공 및 운영에 관한 정보교환과 기술개발 분야에서 세계에서 가장 권위 있는 국제민간학술단체이다.

ICOLD의 활동은 1928년 창립 후 1950년 까지는 전적으로 유럽 국가들이 중심이 되어 운영되었으나 1950년 인도의 델리에서 총회(congress)가 개최된 이후에는 점차 아시아와 중동, 북미와 남미 등의 국가들이 연차회의와 총회를 개최하면서 명실 공히 세계 각국이 참여하는 댐 분야의 국제전문학회로 발전해왔다. (표-1)

아시아 지역에서는 인도와 일본이 3회, 이란, 이집트, 중국이 2회, 터키, 베트남, 인도네시아 및 한국이 1회씩 행사를 개최하였으며, 2000~2003년에 인도의 C.V.J. Varma, 2009~2012년에 중국의 J. Jia박사가 총재를 역임하였으며, 이들 각 개최국에서는 총재 또는 부총재를 배출하였다. 한국대댐회에서는 윤용남 회원과 염경택 회원이 각각 2004~2007년과 2014~2017년에 부총재를 역임한 바 있다.

ICOLD는 양적으로 뿐만 아니라 각 분야별 전문성에 있어서도 지속적인 발전을 해왔으며 세계 각국에서 이루어지고 있는 댐 사업에서 ICOLD의 기술위원회가 발행한 기술서(Bulletins) (2017년 12월 현재 No.174 Action Plan on Capacity Building이 발행됨)는 국제표준과 같은 권위를 인정받고 있다. 이러한 Bulletins는 대개 3~5년 동안에 걸쳐서 해당분야의 기술위원회에 속한 세계 각국에서 모인 엔지니어들 (전문가와 실무자들)의 경험과 지식을 집약한 최신(state-of-the-art) 기술서들이다. 이러한 기술서들은 대개 연차회의 또는 총회 때 각 기술위원회가 주관하는 워크샵 등에서 공개적이고 활발한 논의를 거쳐서 만들어진다. 또한, 기술위원회의 활동과 더불어서 각 연차회의 때 주어지는 주제들에 대한 심포지움에서의 발표와 토론 역시 전통적인 내용뿐만 아니라 최신 기술을 다루고 있어 댐

기술자들에게는 빼놓을 수 없는 좋은 기회이다.

본고에서는 2017년 제85차 연차회의에서 열린 국제심포지움에서 발표된 논문들을 중심으로 몇 개 분야에 대한 기술동향을 한국대댐회 회원들과 공유하고자 한다.

〈표 1〉 ICOLD연차회의 및 총회 개최 현황 (1931~2018)

1928 창립	1976 Mexico
1931 London	1977 Salzburg
1932 Paris	1978 Cape Town
1933 Stockholm	1979 New Delhi (인도)
1934 London	1980 Rome
1935 The Hague	1981 Stockholm
1936 Washington	1982 Rio de Janeiro
1937 Paris	1983 London
1938 Vienna	1984 Tokyo (일본)
1939 Zurich	1985 Lausanne
	1986 Jakarta
1940~1945 (2차대전으로 미개회)	1987 Beijing (중국)
	1988 San Francisco
1946 Paris	1989 Copenhagen
1947 The Hague	1990 Sydney
1948 Stockholm	1991 Vienna
1949 Brussels	1992 Granada
1950 London	1993 Cairo (이집트)
1951 New Delhi (인도)	1994 Durban
1952 Chicago	1995 Oslo
1953 Paris	1996 Santi ago
1954 Paris	1997 Florence
1955 Paris	1998 New Delhi (인도)
1956 Lisbon	1999 Antalya
1957 Istanbul (터키)	2000 Beijing (중국)
1958 New York	2001 Dresden
1959 Helsinki	2002 Iguazu
1960 Tokyo (일본)	2003 Montreal
1961 Rome	2004 Seoul (한국, 제72차 연차회의 개최, 윤용남 회원이 부총재 역임; 2004~2007)
1962 Moscow	2005 Tehran (이란)
1963 Cairo (이집트)	2006 Barcelona
1964 Edinburgh	2007 St. Petersburg
1965 Lausanne	2008 Sofia
1966 Rio de Janeiro	2009 Brasilia
1967 Istanbul	2010 Hanoi (베트남)
1968 Stavanger	2011 Lucerne
1969 Warsaw	2012 Kyoto (일본)
1970 Montreal	2013 Seattle
1971 Dubrovnik	2014 Bali (인도네시아, 염경택 회원이 부총재 역임; 2014~2017)
1972 Canberra (한국 67번째 회원국으로 가입)	2015 Stavanger
1973 Madrid	2016 Johannesburg
1974 Athens	2017 Prague
1975 Tehran (이란)	2018 Vienna

- 01. ICOLD 부총재 활동기
- 02. 2017년 국제대담회 기술동향
- 03. 제85차 국제대담회(ICOLD) 체코 Annual Meeting 참관기
- 04. 『제4회 이란 LTBD 2017』국제컨퍼런스 참관기

2. 주요 기술동향

제85차 국제대담회의 연차회의는 7월 2일 이사회(board meeting)를 필두로 시작되었으며, 국제심포지움은 ‘지식기반의 댐공학(Knowledge-based Dam Engineering)’이라는 대주제와 “댐 공학에서의 첨단 재료, 기술 및 솔루션의 조사 및 적용” 등 9개의 세부주제 하에 7월 5일에 개최되었다 (표-2와 표-3 참조). 논문집에 수록된 301편의 논문 중에서 선별된 구두발표와 포스터발표를 통해 최신의 기술동향이 소개되었으며, 여기서는 그중 눈여겨 볼만한 기술을 일부 발췌하여 소개한다.



〈그림 1〉 제85차 연차회의 이사회



〈그림 2〉 Plenary Session

〈표 2〉 제85차 국제대담회의 연차회의 일정

날짜	프로그램명	주요 내용	참석 대상
7.2	• Board Meeting	• 2017 연차회의의 대비 사전점검회의	총재 1, 부총재 6인 및 사무총장 1
7.3	• Meeting of Technical Committees • City Tour & YEF Meeting • Welcome Reception	• 국가별 댐 관련 사례 토의 및 기술교류 회의로서 주기적으로 토론 및 Bulletin 발간 논의	대담회 회원 자격을 가진 인물 중 각국 대담회 추천으로 선정 ※ 위원만 참여 가능
7.4	• Regional Club Meeting • TC Workshops	• 아시아, 유럽, 아메리카 등 주요 지역별 대담회의 전년도 활동 및 행사 계획 공유, 공동 현안의 해결방안 논의 등 ※ Asia Pacific Group of ICOLD	해당 지역별 회원국 대표 ※ Asia-Pacific Group meeting (의장 : 염경택 회원)
7.5	• International Symposium • Culture Event	• 매년 다른 주제에 대한 최신 기술 발표 및 사례 공유의 장으로서 구두발표와 포스터발표로 구성 • 주최국의 문화홍보 이벤트	논문 심사위원회를 통해 선별된 논문 발표자 및 관심 회원
7.6	• Technical Tour	• 5개소의 댐, 수자원 시설물 및 주요 명소 방문	각국 대표 및 등록자 전원
7.7	• General Assembly • Technical Workshop • Farewell Party	• 회원국 대담회회장들이 참여, 국제대담회의주요 안건 의결 • Technical Workshop (7개 주제)	각국 대담회 대표단 리더 (각국 대담회 회장 혹은 권한을 위임받은 대담회 회원)

〈표 3〉 제85차 연차회의시 국제심포지움의 세부주제

	세부 주제	논문편수
1	Investigation and application of advanced materials, technologies and solutions in dam engineering (댐 공학에서의 첨단 재료, 기술 및 솔루션의 조사 및 적용)	89
2	Enhancements in dam surveillance systems for dam safety and site security (댐 안전 및 현장 안전을 위한 댐 감시 시스템의 확장)	41
3	Uncertainties and risk-informed decision making in dam design construction and operation (댐 설계, 시공 및 운영에 대한 불확실성 및 위험도 기반의 의사결정)	45
4	Balancing technical, socio-economic and environmental aspects of dam engineering (댐 공학의 기술적, 사회경제적 및 환경적 측면의 균형)	22
5	Advancements in analysis and design within flood protection reservoirs, levees and tailing dams (홍수 방어용 저수지, 제방 및 테일링 댐 내의 분석 및 설계의 발전)	29
6	Recent improvements and modern applications in reservoir and catchment management (저수지 및 유역관리의 최근 개선사항 및 최신 응용)	30
7	Design and operational considerations of global climate change, regional droughts and other extreme events (글로벌 기후변화, 지역 가뭄 및 기타 극한상황의 설계 및 운영 고려사항)	18
8	Assessment of aging dams considering remaining service life and decommissioning (잔존 수명과 해체를 고려한 노후댐 평가)	14
9	Hydro-electro-mechanical equipment of dams (댐 수력 전기-기계 설비)	13
	계	301

1) 첨단 재료, 기술 및 솔루션의 조사 및 적용

○ 첨단재료 관련 기술-1 : 흑색혈암 활용기술

금번에 발표된 내용은 新재료가 아닌 오히려 기존에는 기피하였던 건설재료인 흑색혈암(black shale)을 댐축조재료로 활용할 수 있는 기술에 관한 것이다. 혈암은 암석 자체가 지니고 있는 물리적, 화학적 특성 중 공기, 비와 바람 등에

- 01. ICOLD 부총재 활동기
- 02. 2017년 국제대담회 기술동향
- 03. 제85차 국제대담회(ICOLD) 체코 Annual Meeting 참관기
- 04. 7제4회 이란 LTBD 2017, 국제컨퍼런스 참관기

노출되었을 때 다른 암석에 비하여 상대적으로 풍화가 빨리 진행되어 강도가 급격히 저하되는 성질 등으로 인해 일반적 댐축조재료로 활용되지 않는 재료이다.

그러나 독일에서는 댐과 도로 축조용으로 흑색혈암을 사용하고 있으며, 수십 년 전부터 이미 건설재료로 사용하는데 필요한 재료에 대한 시방기준을 갖추고 있다. 다시 말해서 흑색혈암을 댐 또는 도로 축조용 재료로 사용할 때 입도와 다짐도 등을 잘 맞추어 시공할 경우에는 댐 또는 도로로서 충분한 성능을 발휘할 수 있다. 이와 관련된 독일 시방기준은 아래와 같다.

- FGSV 629 (2002)와 FGSV 597 (2009)
- DIN 18130, DIN 4020 및 4021

〈표 4〉 댐 축조재료에 대한 독일 시방기준 (Haselsteiner, 2007)

Requirements/Specifications		dam body			sealing	
		non cohesive	cohesive		cohesive	
		fill material				
		corresp. ²⁾	corresp. ¹⁾	corresp. ²⁾	corresp. ¹⁾	corresp. ²⁾
Stone content/amount oversize material	[-] ≤	20%	35%	20%	35%	-
natural lime content	[-] ≤	10%	10%	10%	10%	10%
organic content	[-] ≤	5%	5%	5%	3%	3%
liquid limit	[-] ≤	nicht- bindiges Material	50%	50%	80%	80%
plastic limit	[-] ≤		20%	25%	20%	25%
plasticity index I _p	[-] ≥		10%	10%	10%	10%
clay content (d ≤ 0.002 mm)	[-] ≥	10%	10%	10%	20%	20%
air pore content	[-] ≤	12%	12%	12%	12%	12%
maximum grain size	[mm] ≤	100	150	60	80 ³⁾	20
permeability k _f	[m/s] ≤	10 ⁻⁵	-	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
degree of compaction (Proctor) ⁴⁾	[-] ≥	100%	100%	100%	100%	100%
layer thickness (before compaction)	[cm] ≤	30 - 50 ⁵⁾	40	30 - 50 ⁵⁾	-	30 - 50 ⁵⁾

¹⁾ DWK 202/1991 (according to LUABW 2006) ⁴⁾ Within one layer 97% compaction degree must not be exceeded.
²⁾ Schäfer & Höfer (2006) ⁵⁾ Layer thickness during field compaction tests.
³⁾ maximum grain size ≤ 10% of layer thickness ≤ 80 mm

한편, 가장 우려되는 장기거동에 대해서도 흑색혈암은 풍화작용에 대해 내구성과 저항성이 있는 것으로 확인되었다. 또한 폴란드에서는 높이 11m, 길이 20km의 홍수조절용 댐 건설시 흑색혈암을 주 축조재료로 사용한 바 있다.

○ **첨단재료 관련 기술-2 : 시멘트고화 댐(Cemented Material Dam, 일명 CMD)**

CMD는 시멘트로 고화처리된 재료로 만들어진 중력식 댐의 한 종류로서 최근에 차세대 댐형식으로 알려져 있다. CMD는 서양에서는 Hardfill, 일본에서는 CSG, 중국에서는 CSGR 등으로 불리우고 있으며, 빈배합의 RCC와는 다른 것으로 규정하고 있다.

ICOLD내의 CMD기술위원회(위원장 Jia Jinsheng, 전 ICOLD총재)에서는 2016년 Johannesburg ICOLD연차회의 때 Hardfill댐의 특징을 다음과 같이 규정한 바 있다.

- No tension design (it means that no tension strength is required in the design; it does not mean that there is no tension stresses in any situation, especially seismic loading)
- Quasi symmetrical shape
- Range of UCS from 3 to 10 MPa (characteristic compressive strength at 90 days)
- Sum of slope is greater than or equal to 1
- Watertight upstream facing

CMD는 탄성계수가 매우 작고 연약한 기초암반 위에서도 건설이 가능하다. 그러나 건설되었을 때 댐체에 발생하는 인장응력을 줄이기 위해 제체, 배합설계 및 골재원 등에 대해 신중을 기하여 제체의 탄성계수를 조절해야 한다. 또한, 제체의 수밀성을 확보하기 위해 노출형 PVC geomembrane과 덮개형 PVC를 조합하여 사용하여야 하며, PVC는 댐축방향의 대변형을 견딜 수 있어야 한다.

한편, 중국, 일본, 프랑스 등에서는 CMD기술을 자국 내는 물론 국제 댐건설 시장에서의 중소규모의 댐건설에 매우 적극적으로 활용하고 있는 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 대형댐의 건설은 이제 거의 불가능하나 지역건뎐의 형태로 아직 중소규모의 댐건설이 추진되고 있고, 국제 댐건설 시장이 열려 있다는 점 등을 고려할 때 CMD기술에 대해 보다 적극적인 연구개발과 실제 활용이 필요할 것으로 생각된다.

○ **기술 및 솔루션**

댐을 불균질한 암반 또는 심각한 단층대에 건설해야 할 때의 해결방안을 찾기 위해 이란에서는 수치 해석적 방법을 제시하였다. 즉, 대규모 단층이 1개 또는 2개일 때, 단층이 댐체로부터 이격되어 있는 경우 또는 접촉하고 있는 경우 등에 대해 2차원 유한요소해석을 하였다. 그들의 해석결과에 따르면 대규모 연약단층대가 댐체 바닥쪽의 0.5B 이내에 있을 경우와 침투의 영향이 포함될 경우 댐체의 거동이 많은 영향을 받는다.

아스팔트 표면차수벽형 석괴댐(AFRD)의 아스팔트 차수벽(asphalt facing)이 겪게 되는 단기 및 장기 노후화 문제(차수성능의 감소 문제)를 해결하는 방안으로 AFRD분야의 거장인 비엔나 공대의 Peter Tschernutter교수는 Asphalt Facing용 재료의 혼합 및 운반 방법 등의 개선과 그 성능과 Aging에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험방법을 제시하였다.

브라질에서는 고해상도 사진영상 촬영과 이미지 프로세싱 기법을 사용하여 콘크리트 댐체의 균열을 신속하고 저렴하게 모니터링하고 분석하는 기법을 제시하였다.

- 01. ICOLD 부총재 활동기
- 02. 2017년 국제대담회 기술동향
- 03. 제85차 국제대담회(ICOLD) 체코 Annual Meeting 참관기
- 04. 7제4회 이란 LTBD 2017, 국제컨퍼런스 참관기

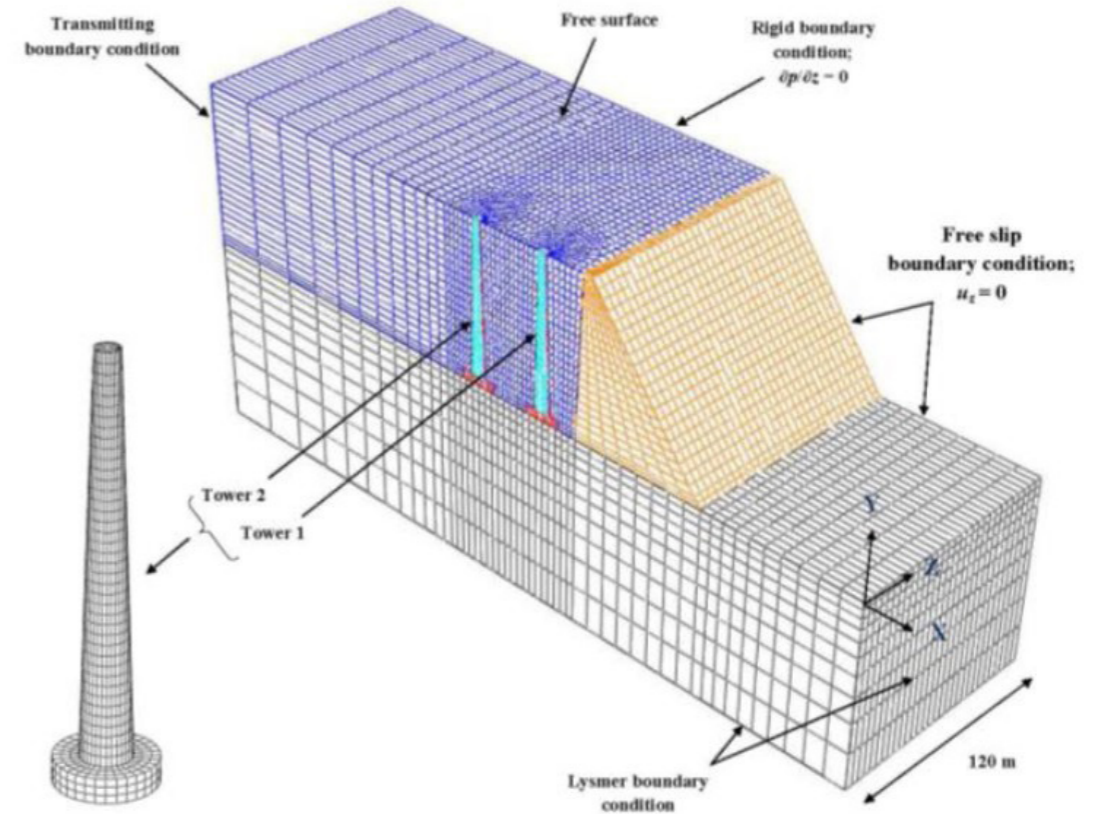
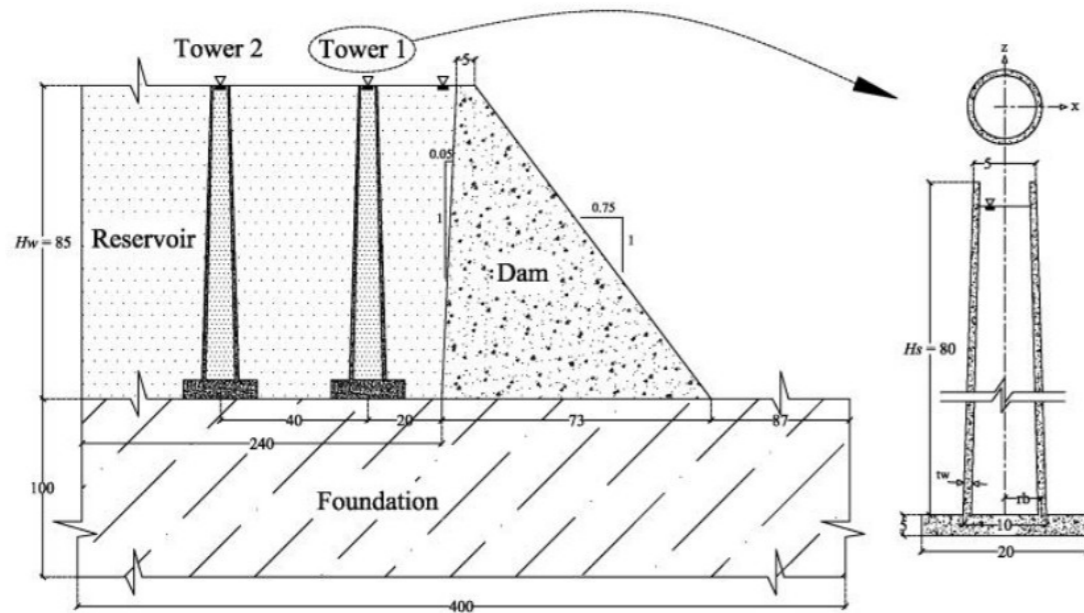
2) 댐 안전 감시 시스템 및 해석 기술

○ 인공위성 SAR데이터를 활용한 지진 전·후의 댐 변형 모니터링

일본에서는 록필댐의 상시 및 지진 후의 변형거동을 모니터링 할 수 있는 기술을 소개하였다. 시범 댐에 대해 5년간 (2011~2015년)의 위성관측 데이터를 분석하여 2015년 4월 18일에 발생한 Kumamoto 지진 후의 변형량을 수 mm의 수준으로 분석하였다. SAR데이터의 이용은 댐체 및 주변에 대하여 별도의 관측점을 설치하지 않아도 되고 날씨의 영향을 받지 않으며 광역적 관측이 가능한 장점이 있다.

○ 댐-취수탑-유체 상호작용 해석

이란에서는 콘크리트 중력식댐-취수탑-유체-기초지반 복합시스템에 대해 실지진파를 적용하여 3차원 동해석을 실시한 결과, 취수탑의 동적거동은 댐체에 의해 크게 영향을 받으며, 기초지반의 강성(stiffness)이 작을 경우에도 큰 영향을 받는 것으로 파악되었다. (그림 3 참조)



〈그림 3〉 실지진파를 이용한 취수탑-댐체-유체-기초지반 상호작용 동해석 (M. Alembagheri, 2017)

3) 잔존수명 및 댐 노후도의 평가

○ 댐의 잔존수명 평가

러시아에서는 책임등급(class of responsibility)에 따라서 달성해야 하는 댐의 수명등급이 차별화되어 있다. 예를 들어 1 및 2등급 시설물인 경우에는 100년, 3 및 4등급 시설물(상대적으로 낮은 댐)은 50년은 견딜 수 있어야 한다. 댐이增高될 경우 책임등급이 상향될 수 있으며, 그로 인해 수명등급도 상향되므로 잔존수명 평가가 중요하다. 잔존수명 평가를 위해서는 반드시 댐체의 노후도 평가가 필요하다. 그들은 잔존수명평가 방법으로 댐체에 대한 상세점검, 지반조사 및 탐사, 다양한 하중 및 환경조건 시나리오에 따른 위험도 평가, 손상제거 및 위험도 저감을 위한 수치해석 등의 종합적 평가를 한 것으로 보고하였으나 상세내용은 제시하지 않았다.(Evgeniy Bellendir 외, 2017)

- 01. ICOLD 부총재 활동기
- 02. 2017년 국제대담회 기술동향
- 03. 제85차 국제대담회(ICOLD) 체코 Annual Meeting 참관기
- 04. 7제4회 이란 LTBD 2017, 국제컨퍼런스 참관기

인도네시아에서는 농업용담에 대하여 퇴사량 예측결과를 토대로 잔존수명을 예측하는 사례를 보고하였다.(Harry M. Sungguh 외, 2017)

○ 담의 노후도 평가

이탈리아에서는 준공 후 60년이 경과한 흙담에 대한 노후도를 다양한 조사와 분석기법 활용하여 분석하였다. 즉, 기존 데이터에 대한 정밀한 분석, 첨단조사를 통한 분석, 최신의 hydro-mechanical simulation 기법에 의한 시간의존성 수치해석 등을 통해 시간경과에 따라서 발생할 수 있는 불균질성과 그로 인한 담의 변형 및 침투거동의 변화를 평가하였다. (Francesco Federico 외, 2017)

ICOLD의 댐안전기술위원회는 댐 및 부속시설물의 노후도의 평가에 관해 다음의 Bulletins을 발행한 바 있다. 일본 국토교통성에서는 2013년에 수자원시설물을 포함한 SOC 인프라의 장수명화 기본계획을 발표하여 추진해오고 있으며, 정부를 비롯한 지자체나 민간기업 등의 다양한 인프라 관리자들이 협동하여 전략적인 유지관리와 재개발에 주력해오고 있다. 이를 통해 그들은 국민의 안전과 안심을 확보하고 중·장기적인 유지관리와 갱신과 관련한 예산의 감축 및 유지관리 분야의 산업경쟁력 제고를 기대하고 있다.

- Bulletin No. 93 (1994) : Ageing of Dams and Appurtenant Works—Review and recommendations
- Bulletin No. 119 (2000) : Rehabilitation of Dams and Appurtenant Works—State of the art and case histories

4) 기타

ICOLD에서는 최근에는 소형담(small dams)과 제방(levee 또는 dyke)에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 2017년 연차회의에서 제방위원회(Technical Committee on Levees, 위원장 Remy Tourment, 프랑스)가 설립되었으며, 2018년 오스트리아 비엔나에서 열리는 제26차 총회(Congress Meeting)에서는 Question No. 103으로 Small Dams and Levees를 선정하여 논의할 예정으로 있다. 다시 말해 국제사회에서 댐 관련 주요 현안과제인 aging 및 risk assessment와 더불어서 small dams 및 levees 등은 이 분야의 기술과 산업발전에도 크게 기여할 것으로 예상된다.

3. 결언

댐과 수자원의 개발·보전 및 활용이 한 나라의 국가발전에 미친 영향을 생각해보면 국제대담회의 역할과 한국대담회를 포함한 각국의 대담회의 역할은 높이 평가받아야 마땅하다. 창립 90년의 역사에 걸맞게 국제대담회는 그동안 댐의 건설, 관리 및 운영, 환경, 사회·문화적 영향, 기후변화의 영향 등과 관련하여 그 시대의 사회적 환경과 과학기술의 발전에 맞추어 지속적으로 기술을 발전시키고 공유해왔다. 이러한 기술의 발전과 공유는 각국의

댐기술자들이 매년 개최되는 연차회의의 심포지움과 기술위원회의 기술보고서 발간 등을 해왔기에 가능했다.

현재, 한국의 댐 관련 산업은 신규 댐 건설이 거의 없어짐에 따라서 깊은 침체기에 있으며, 이러한 상황은 대부분의 선진국(developed countries)들이 공통적으로 겪고 있는 것으로 보인다.

그러나 국제대담회에 참가해보면 이러한 상황에 대해 각 나라마다 다른 대응을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 일본, 중국, 미국, 프랑스, 미국 등 주요 나라에서는 자국 내 뿐만 아니라 국제시장에서의 신규 건설뿐만 아니라 기존 댐의 유지관리, 노후 물 인프라의 안전관리 등과 관련해 매우 활발한 연구개발과 사업화 통해 활기가 넘치고 있는 것을 볼 수 있다.

본고에서는 2017년 연차회의 때 공유된 기술 및 사업에 대하여 매우 제한적으로 소개하였으나 앞으로 한국대담회가 국제대담회에 보다 적극적으로 참가하여 국제적인 기술동향과 시장동향을 파악하고, 댐 관련 기술의 발전과 신사업 창출에도 앞장서기를 기대해본다.

※ 2017년 ICOLD연차회의의 심포지움 논문집(Proceedings of the 85th Annual Meeting, Prague, Czech Republic)은 한국대담회 사무국에 문의하면 받을 수 있음.