

소수력 발전용 고무댐 개발을 위한 유체-구조 연성 해석

김정환* · 황태규**

1. 서 론

고무댐은 평평한 지반위에 설치되어지는 길고 유연한 실린더 구조로써 1950년대에 LADWP(Los Angeles Department of Water and Power)의 N.M. Imbertson에 의해서 최초로 개발되었으며, 2000년대까지 약 1800여 개가 일본, 약 80여 개가 미국, 그 외 호주, 한국, 대만, 태국 등에 설치되었다. 이들 댐은 기본적으로 긴 튜브형태이고, 고무로 만들어지며, 공기, 물, 또는 두 가지의 조합에 의해서 부풀려진다. 댐을 만들기 위한 고무판의 두께는 약 5mm에서 32mm 내외이며, 댐의 수명은 약 40년 이상이다.

공기를 이용한 고무댐의 경우 공기를 넣거나 뺀으로써 고무댐의 기립(起立)과 도복(倒伏)을 조절할 수 있으며, 이를 통하여 고무댐은 홍수조절(Tam, 1997), 레크레이션용 저수, 강가의 침식 방지, 관계용 치수(Tam, 1997), 조경용, 소수력 발전 (Sehgal, 1996)등 여러 용도로 사용되고 있다.

국내의 경우 제작되고 있는 고무댐의 보강포의 층수는 일반적으로 2층으로 구성됨에 따라 설치높이의 제한 및 요구되는 소수력 발전용량에 따른 정수압 확보가 어렵다. 또한, 고무본체와 일체형이 아닌 접착형식을 따른 통기판 방식으로 인해 월류시 진동으로 인해 내구성 확보의 어려운 단점이 있다. 이에 따라 보의 크기와 요구되는 정수압에 부합되는 고무댐의 경우 국내 제작이 어려우므로 상당량을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 기사에서는 한국형 공기주입식 고무댐 개발을 위한 유체-구조 연성해석을 소개하고자 한다.

2. 공기주입식 고무댐의 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction) 해석

2.1 유체-구조 연성 해석

유체의 유동에 의한 압력분포는 구조물에 변형을 일으키고, 그 구조물 변형은 다시 유동장의 변화를 가져오며 이 유동장(압력분포)의 변화는 또 다시 구조물의 변형을 일으키는 상호작용이 나타난다. 이와 같이 유체 유동과 구조 변형이 상호 연계되어 나타나는 물리적인 현상을 유체-구조 연성(FSI)이라 한다.

고무와 같은 비선형 재료를 해석하기 위해서는 <표 1>과 같이 여러 가지 모델이 사용되어지며, 본 연구에서는 식 (1)과 같은 3차 Mooney-Rivlin 모델을 사용하여 고무댐의 변형을 해석하였다. <표 2>는 실제 사용된 고무재질에 대한 Mooney-Rivlin 상수값과 탄성계수 및 포외송비를 나타낸 것이다.

$$\psi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{10}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (1)$$

FSI를 하기 위하여 고무댐은 공기가 찬 탄성 셀로써 모델링 되었으며, 댐의 기계적 특성은 유한요소법에 의하여 조사되어졌다. 한 방향 유체-구조 연성(One Way Coupling FSI) 해석은 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계로, 도복(倒伏)된 형태로 모델링 되어진 고무댐에 내압 0.01MPa를 주어 댐의 높이가 약 30cm에 도달했을 때 기립(起立)된 댐의 형상을 이용하여 유동장 해석 및 댐 표면에 작용하는 압력분포를 계산하였으며, 다음 단계는 유동장에 의한 고무댐 표면의 압력분포를 사용하여 댐의 구조변형을 해석하였다.

* 한국조선기자재연구원 에너지해양연구본부
E-mail : jhkim@komeri.re.kr

** 한국조선기자재연구원 에너지해양연구본부
E-mail : andrew@komeri.re.kr

Table 1 Analysis model for nonlinear materials

고무 특성	모델	적용범위	비고
비압축성	Neo-Hookean	30%	-
	Mooney-Rivlin	30% -200%	비압축성 탄성중합(elastomer) 자동차 타이어를 위한 고무 및 고무댐 해석을 위해 적용
	Arruda-Boyce	Upto 300%	실리콘과 네오프렌(neoprene)과 같은 고무에 적합, 제한적인 시험데이터에 적용
	Ogden	Upto 700%	다양한 시험을 통한 데이터 획득이 가능할 때, 양호한 curve fitting을 모사함.
압축성	Blatz-Ko	-	압축성 polyurethane foam rubbers의 해석에 적용
	Hyperfoam	-	Cushion, sponge 또는 padding과 같은 고무압축성 재료의 해석에 적용

Table 2 Property of using material

Mooney-Rivlin 3항 상수		복합재질	
C10 (MPa)	1.48109	탄성계수 (MPa)	372.6924
C01 (MPa)	0.53134		
C11 (MPa)	0.04131	포와송비	0.3

2.2 모델링

고무댐의 한 방향 유체-구조 연성 해석을 수행하기 위하여, 고무댐 형상 자체에 대한 격자와 유동해석을 위한 격자 2가지를 각각 만들어서 해석을 수행하였다.

2.2.1 구조 해석을 위한 고무댐 형상 모델링

Fig. 1의 고무 및 보강포의 두께를 이용하여, Fig. 2와 같이 총 882개의 노드를 사용하여 쉘 형태의 유한요소모델로 모델링을 하였다. 공기를 주입하기 전 자중에 의한 영향을 고려하기 위해 약 10초 동안 쉘 안에 압력을 주지 않았으며, 그 결과 Fig. 3과 같은 형상을 이루는 것을 확인하였다.

Fig. 3과 같은 초기 댐의 형상에 대해 공기압 0.01 MPa를 주입하여 댐의 높이가 약 30cm에 도달하였을 때의 고무댐의 형상으로 유동해석을 수행하였다.

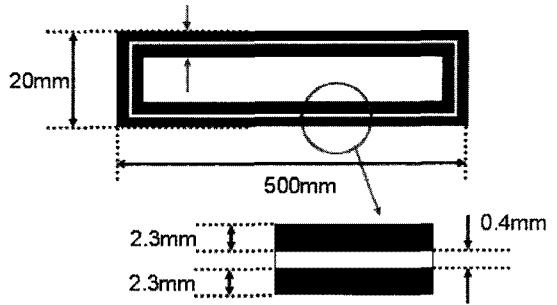


Fig. 1 Sketch of Rubber dam for modeling

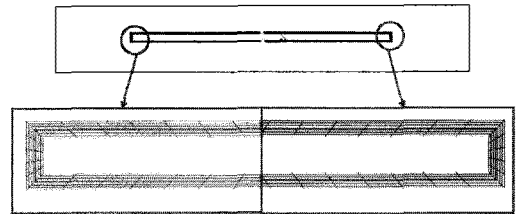


Fig. 2 Finite element modeling for rubber dam

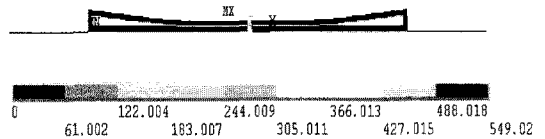


Fig. 3 Effect of standard earth gravity for rubber dam

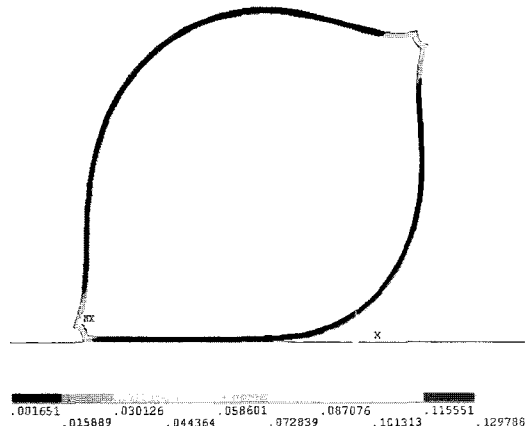


Fig. 4 Inflatable rubber dam's shape at 0.963sec

Fig. 4는 공기가 주입되어 댐의 높이가 약 30 cm에 도달하였을 때의 형상 및 고무댐 내,외부의 응력분포를 함께 나타내었다. Fig. 3의 초기 형상에서 Fig. 4의 형상에 도달하기까지 약 0.963초 정도 걸렸다.

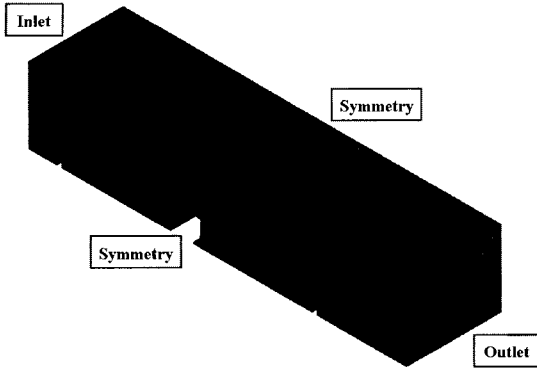
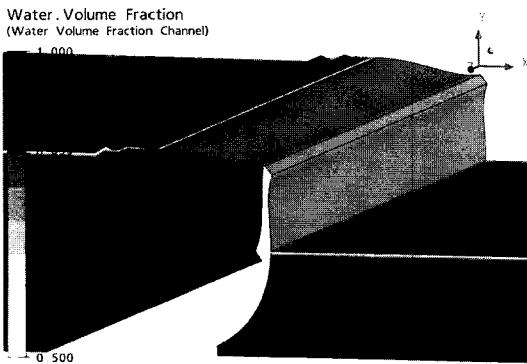
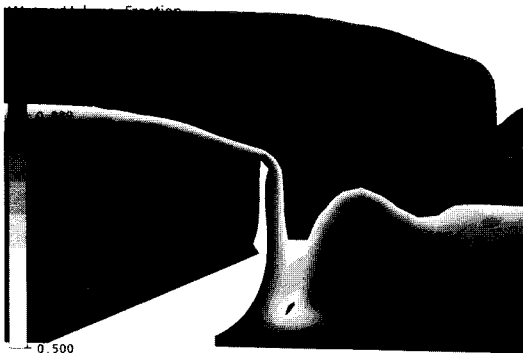


Fig. 5 Hexa mesh system for fluid field of rubber dam



(a) Open channel flow with rubber dam at t=0 sec



(b) Open channel flow with rubber dam at t=15 sec

Fig. 6 Instantaneous water stream at open channel

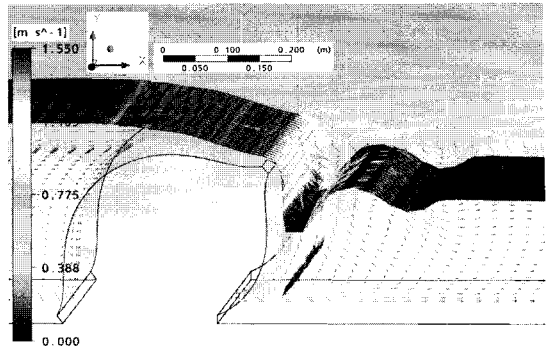


Fig. 7 Velocity distribution of center of xy section with free surface at 15sec of the surrounding rubber dam

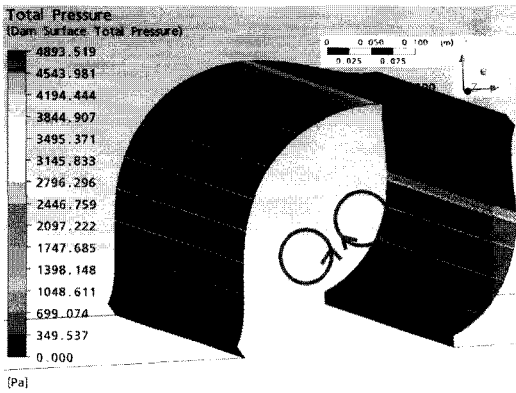
2.2.2 유동 해석을 위한 고무댐 형상 모델링

고무댐 주위의 유동장 해석을 위한 격자계는 Fig. 5과 같다. Fig. 4의 고무댐 외형형상을 고려하여 모델링을 하였으며, 격자는 육사형을 이용하여 275,000개의 노드로 이루어졌다. 해석을 위한 경계조건은 다음과 같다. 입구는 0.1 m/s의 속도조건을 주었으며, 출구는 정압 0Pa을 주었다. 또한 벽면은 No Slip조건을 사용하였으며, 고무댐의 양쪽 끝단은 Symmetry조건을 사용하여 SST난류모델로 해석을 수행하였다. 개수로 유동이므로 해석에 사용되는 유체는 고무댐을 지나는 물과 상부에 존재하는 공기 두 가지를 고려한 이상유동에 대한 해석을 하였다. 개수로 유동의 경우 물과 공기가 접하는 자유표면이 존재하므로, 자유표면에 해당하는 부분에는 상대적으로 많은 격자를 두었다. 계산은 0.01초 간격으로 수행하였으며, 계산의 결과는 0.1초 간격으로 15초까지 해석을 수행하였다.

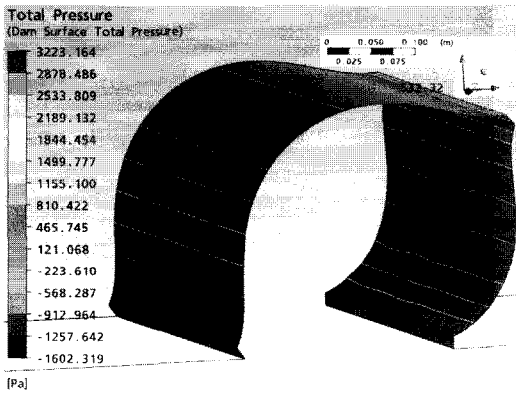
고무댐 주위를 물이 지날 때 자유표면 변화에 따른 유동장과 고무댐에 미치는 압력을 계산하여 고무댐에 대한 구조해석에 사용하였다. 또한 고무댐 주위 유동장을 함께 규명하였다.

2.3 유동장 해석 결과

Fig. 5의 격자계를 이용하여 개수로 유동을 해석하였으며, Fig. 6의 (a)와 (b)는 개수로에서 시간에 따른 고무댐 주위의 순시적인 물의 흐름을 나타낸 것이다. (a)는 물이 유입하기 전 초기에 댐 높이까지 물을 채워놓은 상태이며, (b)는 (a)로부터 15초가 지난 순간의 물의 흐름을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 물의 표면에 하얗게 보이는 것은 기포이다.



(a) Total Pressure distribution at 0sec



(b) Total Pressure distribution at 15sec

Fig. 8 Total pressure distribution of the surface of rubber dam

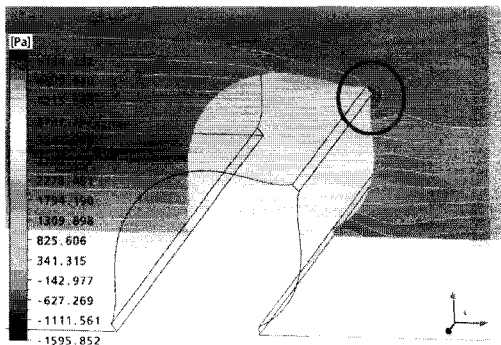


Fig. 9 Static Pressure distribution of center of xy section at 15sec

Fig. 7은 Fig. 5의 개수로 유동결과를 나타낸 것으로, 15초 후의 XY 단면 중심에서의 속도벡터 및 자유표면과, 자유표면에서의 속도벡터를 함께 나타내었다.

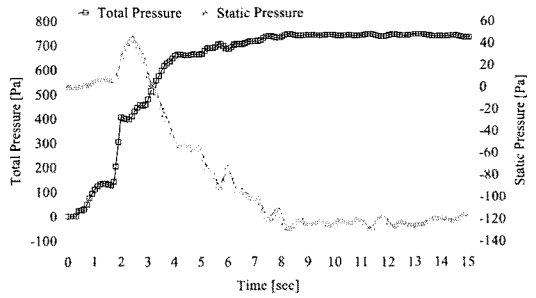


Fig. 10 Total pressure vs static pressure at the end of rubber dam's pin

고무댐의 상단 끝부분에서 상대적으로 큰 속도벡터를 보이는데, 이는 댐의 상단 끝단부에서 물이 하류로 낙하하면서 공기에 의한 이상유동이 일어남으로써, 공기 중에 물방울이 비산됨으로써 이 부분에서의 속도벡터들이 다른 영역에 비해 상대적으로 많이 튀는 것으로 생각되어진다. 또한 자유표면상의 속도벡터를 살펴봄으로써 댐 상단에서 떨어져나가는 큰 벡터들이 물방울이 비산된 것임을 직간접적으로 유추할 수 있었다. 또한 빨간색 원과 같이 고무댐의 하류부에 서로 다른 방향의 와가 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 물이 유입되기 전과 후의 전압분포를 나타낸 것으로, (a)는 계산 시간의 단축을 위하여, 댐의 높이에 해당하는 만큼의 물을 미리 채운 후 물이 유입되기 직전의 전압분포를 나타낸 것이다. (b)는 15초 후의 고무댐 표면의 전압분포를 나타낸 것이다. 초기 물이 유입되기 전의 고무댐에서의 전압분포를 살펴보면, 물이 채워지지 않은 고무댐 상단부의 경우 (a)와 같이 초기 압력이 0이 됨을 확인할 수 있었으며, 시간이 지나감에 따라 (b)와 같이 고무댐 상부의 전압분포가 변하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 15초 후의 XY단면의 중심에서의 정압분포를 나타내었으며, 빨간 원과 같이 고무댐 상단의 끝단부에서 (-)압이 걸리는 것을 확인할 수 있었다. 고무댐 상단의 끝단부에서 생성되는 (-)압이 주기적으로 반복될 경우, 고무댐의 통기편부에서 진동이 발생될 것으로 사료된다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 (-)압이 발생하는 지점, 고무댐 상단의 끝단인 한 지점에서 시간의 변화에 따른 전압과 정압을 그래프로 나타낸 것이다. 정압의 경우, 0초일 때, 핀의 끝단부까지 물이 채워지지 않은 상태이므로, 정압이 0이며, 시간 증가에 따라, (-)압이 됨을

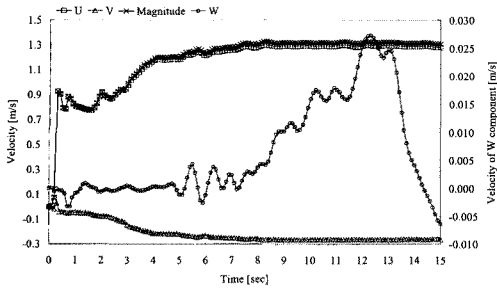


Fig. 11 Velocity distribution of each components and magnitude at the end of rubber dam's pin

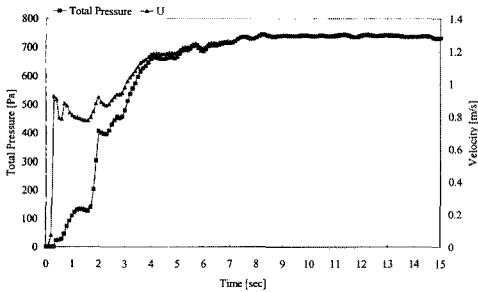


Fig. 12 Total pressure vs velocity U component at the end of rubber dam's pin

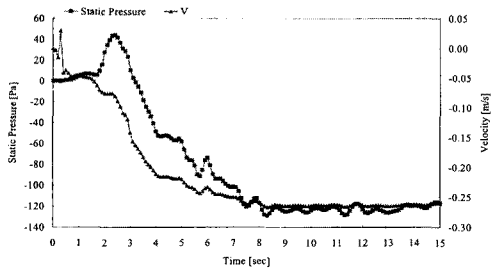


Fig. 13 Static pressure vs velocity V component at the end of rubber dam's pin

확인할 수 있었으며, 약 8초를 기점으로 하여 정압차가 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 8초 이후에 정압이 요동치는 것을 볼 수 있었다. 전압의 경우는 역시 0초일 경우 핀의 끝단부까지 물이 채워지지 않으므로, 전압이 0이며, 이후 시간이 지남에 따라 전압이 증가함을 확인할 수 있었다. 급격히 증가해오던 전압이 8초를 기준으로 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 이는 고무댐 주위의 속도벡터들에 의한 동압의 증가에 기인한 것으로 생각되어 진다.

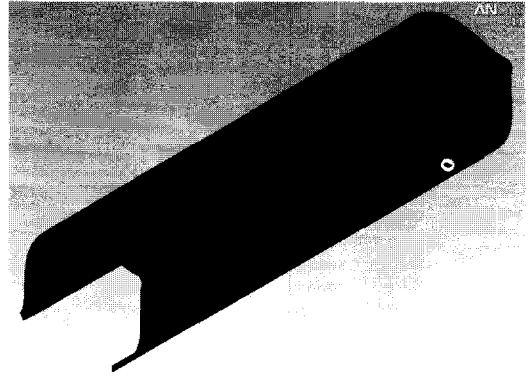


Fig. 14 Initial meshed model for Rubber dam's deformation

Fig. 11은 고무댐 상단의 핀 끝단인 한 지점에서 각각의 속도성분과 속도크기를 나타낸 것으로, 속도성분 U와 V는 약 8초 이후 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었으며, 속도 성분 V의 경우 고무댐 상단의 핀 끝단으로부터 물이 떨어지므로, (-)값을 갖는 것을 확인할 수 있었으며, W성분의 경우는 Fig. 11의 그래프상으로는 변위가 가장 큰 것으로 보이지만, 실제로는 U, V, W 세 가지 속도성분 중 가장 영향력이 적게 미친다. 특히 속도크기와 비교해 볼 때, 속도크기에 가장 큰 영향을 미치는 주흐름은 U성분임을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 전압과 Fig. 11에서 U와의 관계를 그래프로 나타낸 것으로, 4초 이후에 U가 일정한 속도를 유지함에 따라, 전압도 일정하게 유지함을 확인하였다.

Fig. 13은 정압과 Fig. 11에서 V와의 관계를 그래프로 나타낸 것으로, 8초 이후에, V는 일정하게 유지하고 있으나, 정압의 경우는 이와 달리 요동치는 것을 확인할 수 있었다. 즉 이 요동이 고무댐 끝단인 핀에서의 진동을 발생시키는 원인이 될 것으로 사료되어진다.

3. 공기주입식 고무댐의 유체-구조 연성해석결과

고무댐에서의 한방향 유체-구조 연성해석은 다음과 같은 과정을 거쳐 수행되어졌다.

Fig. 4의 댐 형상을 이용하여 Fig. 5의 격자계를 생성한 후, Fig. 7과 같은 유동장 해석결과를 이용하여 Fig. 8과 같은 댐에 작용하는 표면압력을 구한 후, 이 표면압력을 댐에 작용하는 외력으로 하여 고무댐의 구조변형을 계산함으로써 한 방향 유체-구조 연성해석을 수행하였다.

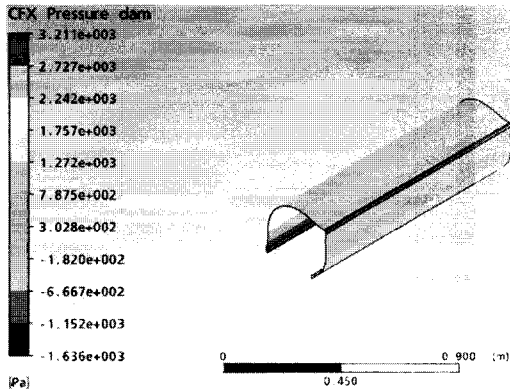
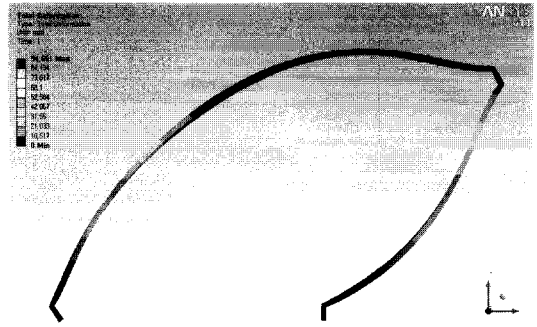


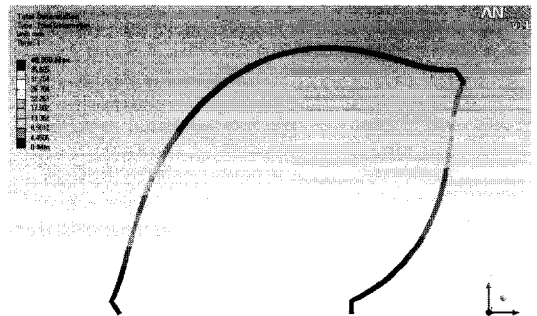
Fig. 15 Initial condition for structure analysis of rubber dam



(a) Deformation of rubber dam without inner pressure



(a) Stress distribution



(b) Deformation of rubber dam with inner pressure 0.01MPa



(b) Deformation of rubber dam

Fig. 16 Structure deformation of rubber dam for surface pressure

Fig. 17 Effect of inner pressure at deformation of rubber dam for surface pressure

고무댐의 구조변형을 계산하기 위하여 Fig. 14와 같은 댐의 형상에 13,230개의 노드를 사용하여 격자를 생성하였다. Fig. 15는 Fig. 8의 댐에 작용하는 표면압력을 Fig. 14에 작용하는 외력으로 초기화시킨 형상을

나타낸 것이다. Fig. 14에 댐의 표면압력을 외력으로 하여 구조해석을 수행하여 Fig. 16과 같은 댐의 구조 변형을 구하였다. Fig. 16의 (a)는 응력분포를 나타낸 것으로, 가장 높은 응력이 댐을 고정하여 지지하는 하단부에 생김을 확인할 수 있었으며, Fig. 16의 (b)는 변형을 나타낸 것으로 고무댐에 있어 가장 큰 변형이 이루어지는 곳은 자유단에 해당하는 댐의 상단부임을 확인할 수 있었다. 실제 고무댐에서 콘크리트 바닥면에 볼트로 고정되어지는 부분인 (a)는 변형보다는 상대적으로 큰 응력을 받게 되며, (b)와 같이 자유단에 해당하는 고무댐의 상단에서는 외력이 변형을 일으키는데 작용하므로 상대적으로 적은 응력을 받게 되는 사실에 비취볼 때, 해석 결과가 타당함을 간접적으로 확인할 수 있었다. 즉, 고무댐이 외팔보형태로 설치되어짐으로써, 고정단에 해당하는 부분인 댐의 하단부에

서는 상대적으로 큰 응력이 작용하고, 댐의 자유단에 해당하는 상단부에서는 고정단인 하단부에 비해서 상대적으로 변형이 크게 일어나는 물리적인 현상과 일치함을 의미한다.

고무댐 내부의 압력이 유동변화에 따른 댐의 표면에 작용하는 압력에 대해 댐의 구조변형에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 댐의 내부에 공기압이 없는 경우와 댐의 내부에 공기압 0.01MPa이 존재할 경우에 대해 댐의 구조해석을 수행하였다. 댐의 구조해석 결과는 Fig. 17와 같다. Fig. 17의 (a)는 댐에 내부압이 존재하지 않는 경우이며, (b)는 댐에 내부압 0.01MPa이 존재하는 경우이다. Fig. 17의 (a)와 (b)를 살펴보면, 댐에 내부압이 존재하는 경우인 (b)가 내부압이 존재하지 않는 경우인 (a) 보다 외력에 의한 변형이 작게 일어남을 확인할 수 있었으며, 이는 고무댐의 주위에 흐르는 물의 수위가 일정하다고 가정할 시에 일정한 수위에서 댐에 작용하는 표면압력에 대해 고무댐이 기립(起立)시 고무댐 설치시의 댐의 높이를 유지시킬수 있는 최적의 내부압력이 존재함을 암시한다. 고무댐의 내압이 높으면 댐 주위의 유동장에 의한 표면압력인 외력을 견디게 되므로 댐의 변형은 작게 이루어지나, 상대적으로 댐을 이루는 고무재질의 내압에 대한 강성을 높여야 하는 결과를 초래한다. 이는 댐에 작용하는 외력에 대해 댐의 높이를 항상 일정하게 유지하는 최적의 내압을 구함으로써, 고무재질의 내압에 대한 강성을 최적화할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 언

한국형 공기 주입식 고무댐 개발을 위한 한 방향 유체-구조 연성해석을 수행하였다.

1. 고무댐 상단의 핀 끝단인 한 지점에서 각각의 속도 성분과 속도크기를 살펴본 결과, 속도크기와 비교해 볼 때, 속도크기에 가장 큰 영향을 미치는 주흐름은 U성분임을 확인할 수 있었다.
2. 고무댐 상단의 핀 끝단부에서의 전압과 U성분간의 관계를 살펴보면, 주흐름에 해당하는 U성분이 전압에 가장 큰 영향을 주었다.
3. 고무댐 핀 끝단부에서의 정압과 V성분간의 관계를 살펴보면, V성분은 핀 끝단부에서 하류층으로 흘러감으로써 (-)속도를 갖게 되며, V성분이 정압에 있어 가장 큰 영향을 주었다. 또한 8초 이후의 핀 끝

단부의 정압의 변화가 요동을 치는 것으로 보아, 고무댐의 통기핀이 유체 유동에 의해 진동함을 직간접적으로 확인할 수 있었다.

4. 고무댐의 경우 외팔보형태로 설치되어짐으로, 고정단에 해당하는 댐의 하단부에서는 응력이 집중되며, 자유단에 해당하는 댐의 상단부에서는 변형이 크게 일어남으로써 하단부에 비해 응력이 적게 걸리는 사실에 근거하여 본 연구에서 수행되었던 고무댐의 한 방향 유체-구조 연성해석 결과가 타당함을 확인할 수 있었다.
5. 한 방향 유체-구조 연성해석을 통하여 댐에 작용하는 외력에 대해 댐의 높이를 항상 일정하게 유지하는 최적의 내압을 구함으로써, 고무재질의 내압에 대한 강성의 최적설계에 적용될 것으로 사료된다.
6. 수행되었던 결과는 고무댐 내에 작용하는 내압, 고무판재의 두께, 적층되어질 보강조의 개수, 고정금구의 개수 등을 고려한 고무댐 형상 설계 최적화에 사용될 것이다.
7. 추후에는 고무댐에 대하여 양방향 유체-구조 연성해석을 수행하고자 한다.

참고문헌

- [1] N.M. Imbertson, "Automatic rubber diversion dam in the Los Angeles River", Journal of the American Water Works Association, Vol. 52, pp. 1373-1378, 1960.
- [2] P.W.M. Tam, "Use of rubber dams for flood mitigation in Hong Kong", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 123, pp. 73-78, 1997.
- [3] C.H. Sehgal, "Design guidelines for spillway gates", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, pp. 155-165, 1996.
- [4] Guruprasad V. Mysore, "Vibration Analysis Of Single-Anchor Inflatable Dams", Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.6.
- [5] G. V. Mysore and S. I. Liapos, "Dynamic Analysis of Single-Anchor Inflatable Dams", Journal of Sound and Vibration, Vol. 215, No. 2, pp. 251-272, 1998.
- [6] C. M. Dakshina Moorthy, J. N. Reddy, "Three-Dimensional Vibration of Inflatable Dams", Thin-Walled Structures, Vol. 21, pp. 291-306, 1995.