

# 다단계어 가동보의 구조성능 평가를 위한 해석적 연구

이해수\*, 박태현\*\*,#

\*경남과학기술대학교 자동차공학과, \*\*경남대학교 기계공학부

## An Analytical Study of Structural Performance Evaluation for Multi-stage Control Movable Weir

Haesoo Lee\*, Taehyun Park\*\*,#

\*Department of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology.

\*\*School of Mechanical Engineering, KYUNGNAM UNIV.

(Received 25 January 2021; received in revised form 08 February 2021; accepted 02 March 2021)

### ABSTRACT

Movable weirs with multi-stage control are necessary in many Korean rivers to actively control the water storage level. A mesh dependency test was performed to determine the appropriate number of meshes for structural analysis of movable weirs. The standing angles of movable weirs were set to 60°, 45°, 30°, and 15° for stress analysis. The standing angle of 0° was excluded from the analysis because it was unloaded. Changes in the standing angle led to changes in the water depth, maximum pressure, maximum strain, and maximum stress. The maximum average stress and the structural safety of the multi-stage control movable weir were computed and tested using the Ansys FEA software package.

**Key Words** : Movable Weir(가동보), Hydrostatic Pressure(정수압), Von Mises Stress(폰 미세스 응력), Safety Factor(안전계수)

### 1. 서 론

우리나라에는 중소형의 강이나 하천이 많으며 식수, 농업용수, 농업용수, 발전, 치수 등의 목적으로 댐이나 소형의 보를 많이 설치했다. 보 중에는 수문이 없이 월류에 의해서만 일정 수위를 유지하는 형식의 고정보와 수문의 설치나 보의 높이를 가변시켜 능동적으로 수위를 조절할 수 있는 가동보로

나눌 수 있다.<sup>[1]</sup> 그 중에서 다단계어식 가동보는 보통 계단형의 콘크리트 바닥으로 설치되어 있는 강이나 하천에 설치한다. 폭우나 강이 범람하는 홍수 시에는 치수를 위해 개방하며 강수량이 비교적 적거나 가뭄 때는 물을 일정량 필요한 수위로 가두어 적절히 활용할 수 있다. 또한 환경적 측면에서도 수생 동식물의 보호에도 능동적으로 대처할 수 있는 것으로 알려져 있으며 최근 적용사례도 증가함과 더불어 다양한 형태의 가동보가 연구, 개발, 설치, 운용되고 있다.<sup>[2]</sup>

최진우 등은 해석적 연구를 통해 보의 개별 부품

# Corresponding Author : taehyun@kyungnam.ac.kr

Tel: +82-55-249-2615, Fax: +82-505-999-2160

별로 FEA(Finite Element Analysis, 유한요소해석)를 통해 인장응력, 압축응력 그리고 좌굴 등을 연구했으며<sup>[2]</sup> 조희근은 원통 구조물의 좌굴에 대해서 연구하였다.<sup>[8]</sup>

서경원 등은 가동보수문의 운영 중 발생하는 예상치 못한 진동에 대해서 중점적으로 연구하였다.<sup>[3]</sup> 이 연구에서 진동의 원인은 수문의 설계 방법 및 구조형식 뿐만 아니라 방류의 형태 등에 따라 복합적인 작용으로 일어난다고 보았다. 따라서 향후 가동보수문의 설계 시 비정상적인 수문 운영조건을 반영해야 함을 주장했다.

김기원 등은 개량형 가동보의 강판재료 표면처리를 통해 강판재료와 GFRP와의 부착력을 향상시키고자 했다.<sup>[4]</sup> 총 4가지 방법으로 강판재료의 표면처리 한 후 휨시험을 통하여 하이브리드 강판/GFRP 패널의 휨강도 뿐만 아니라 강판재료와 GFRP 패널 부착계면의 계면 분리 및 탈락 여부를 평가하였다.

안정민 등은 수치모형을 통해 하천에 존재하는 수리구조물들의 유사이송을 연구하였다.<sup>[5]</sup> 특히 2006년 태풍 “에위니아”사상을 대상으로 모형을 검·보정 하였으며, 모의결과와 관측값의 비교를 통하여 전체 모의구간에서 신뢰성 있는 결과가 도출하였다. 강정고령보가 건설된 이후 태풍사상에 의한 하상변동은 가동보 구간에서 상당히 증가했으며 하상변동은 유사의 재분배를 야기했다고 하였다.

최계은 등은 가동보의 설정 각도별 수위변화에 대해서 실험적 연구를 수행하였다.<sup>[6]</sup> 실험의 결론은 수위의 변화는 수로에서 거리에 따른 수위변화보다 하쪽에 더 큰 영향을 받았으며, 저층수의 유입구 유무에 따른 수위의 변화에서는 상류로 갈수록 수위가 증가한다고 보고하였다. 즉 저층수의 유입구 유·무는 수위변화에 큰 영향이 없었다는 것이다.

기존의 연구 결과들은 보와 관련된 수리학적, 재료적 그리고 환경적 측면들이 많이 연구되었다. 그러나 보 구조물 전체에 대한 매쉬 의존성 테스트, 세세한 기립단계별 구조 해석 결과는 없었다.

본 연구에서는 점검대가 구성되어 있는 다단계어식 가동보에 정수압(hydrostatic pressure)을 적용해서 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과로 가동보면의 기립각도별로 총 변형량과 Von Mises 응력의 최댓값을 조사했다. 그리고 응력의 최댓값을이용해

서 안전계수를 산출해 가동보의 안정성을 평가 하였다.

## 2. 해석 모델 및 모델의 형상 단순화

힌지결합 다용도 비상다리형 다단계어식 가동보(이하 가동보)의 모델은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타나 있다. 가동보는 Fig. 1처럼 지면과 이루는 각도 60°일 때 최대 1300 mm의 수압을 받게 되며 0°로 완전히 전도되면 그림의 하단까지 가동보가 내려 가게 된다. Fig. 1의 (a)에서 해칭(hatching)된 부분은 철근콘크리트로 매설되는 부분이며, Fig. 2의 (b)에서 짙은 파란색 부분이 여기에 해당된다. 가동보는 Fig. 2의 (a)에서 ①~⑤와 같이 유압장치(Fig. 2의 (b) 녹색 부분)를 이용해서 각각 0°~ 60°까지 임으로 수문을 조절 할 수 있다. 이 때 기립과 전도의 거동은 40°/min이며 각 단계별로 각도의 오차 범위는 2°이다.

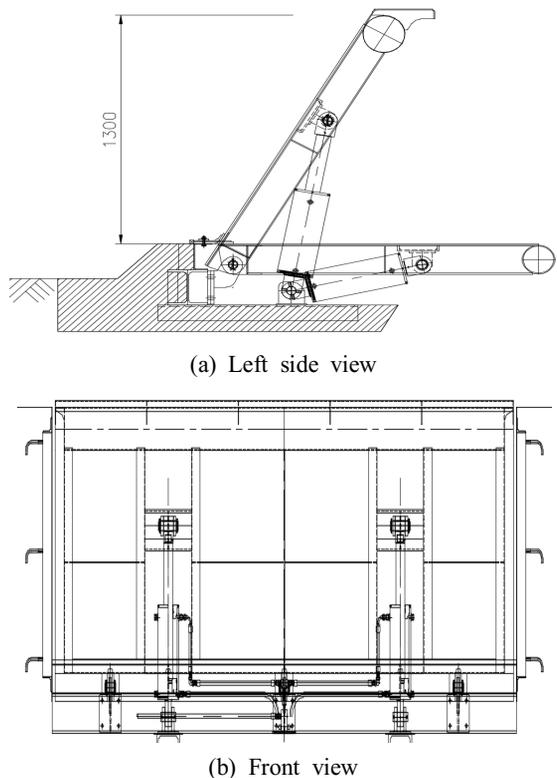
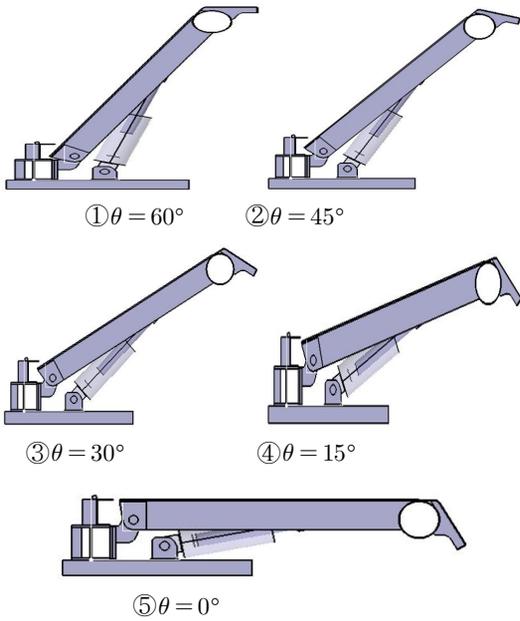
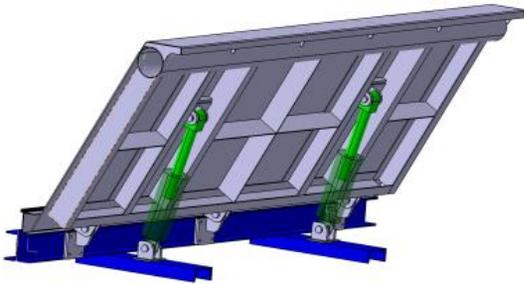


Fig. 1 2D drawing of movable weir

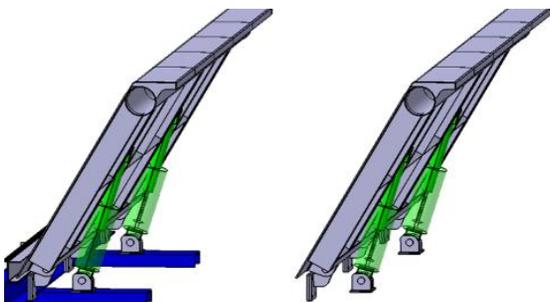


(a) Positions of movable weir by  $\theta$



(b) Three-dimensional model( $\theta = 60^\circ$ )

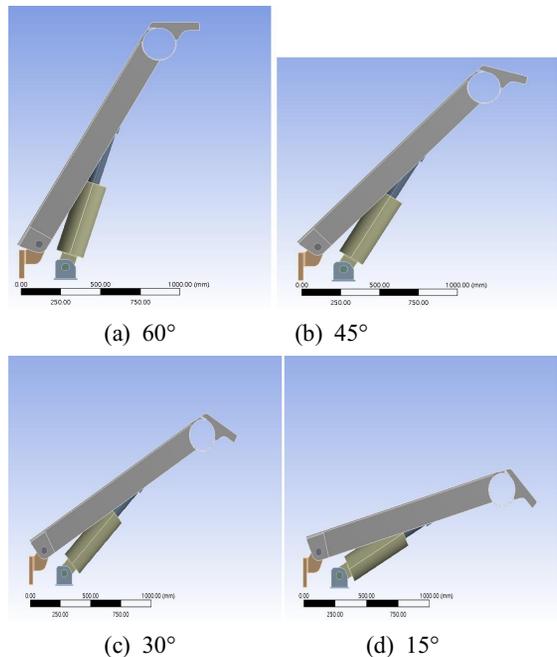
Fig. 2 Positions and three-dimensional model of movable weir by  $\theta$



(a) movable weir (b) Simplified operation beam  
Fig. 3 Simplified figures of the movable weir

해석에서는 기립각( $\theta$ )도 60°, 45°, 30°, 15°만 사용되었고 0°의 것은 사용하지 않았다. 그 이유는 수압이 전혀 인가되지 않는 무부하 상태이기 때문이고, 가장 부하가 많이 걸리는 기립각도 60°에서만 가동보가 이상이 없으면 나머지 각도에서는 정상작동을 할 수 있다.

Fig. 3의 (a)실제 가동보의 형상과 (b)단순화가 적용된 가동보를 나타내고 있다. Fig. 3의 (a)에 있던 파란색 부분의 빔 요소들과 고무판을 잡아주는 요소들은 해석에 영향을 주는 요소가 아니기 때문에 이를 제외함으로써 형상을 단순화 해서 해석에 드는 메모리의 양과 계산 시간을 최소화 했다. Fig. 3의 (b)에서 가동보의 상판 부분의 선(edge)은 안쪽의 것인데 상대적으로 얇은 상판 때문에 나타난 것이지만 실제 외부에서 볼 수 있는 선이 아니다. Fig. 4는 해석 틀에서 단순화된 모델을 읽어 들인 것이다. 왼쪽부터 차례로 60°, 45°, 30° 그리고 15°이며 이때의 수심은 각각 달라진다. 이 변화하는 수심에 따른 최고압력을 Table 2에 정리했다.



(a) 60° (b) 45° (c) 30° (d) 15°  
Fig. 4 Position of each movable weir at each standing angle

### 3. 재료의 물리적 성질 및 경계조건

Fig. 2 (b)에서 파란색으로 표시된 일반구조용 강재 부분과 유압 시스템 부분은 SS400 이며 나머지는 모두 STS304가 적용되었다. SS400과 STS304의 물성치는 Table 1에 나타내었으며 이 물성치는 www.matweb.com을 참고해서 적용했다.

수심별 수압은  $p = \gamma \cdot h$ 로 계산할 수 있다. 여기서  $p$ 는 압력(Pa),  $\gamma$ 는 비중량( $N/m^3$ ) 그리고  $h$ 는 수심(m)이다. 수심이 깊어지면 압력도 같이 상승하게 되므로 수문의 면에 일률적인 압력이나 힘을 가하게 되면 실제 현상을 모사할 수 없다. 따라서 본 해석에서는 Hydrostatic Pressure라는 하중 옵션을 이용해서 계산을 수행했으며 중력가속도는  $9.8 \text{ m/s}^2$ 이고, 물의 밀도는  $4^\circ\text{C}$ 에 해당하는 값인  $1,000 \text{ kg}_m/m^3$ 이 적용되었다.

Table 1 Material properties of SS400 and STS304

| Material                      | SS400 | STS304 |
|-------------------------------|-------|--------|
| Density ( $\text{kg}_m/m^3$ ) | 7,800 | 8,000  |
| Young's modulus (GPa)         | 200   | 193    |
| Poisson's ratio               | 0.3   | 0.29   |
| Yield strength (MPa)          | 230   | 330    |
| Tensile strength (MPa)        | 515   | 590    |

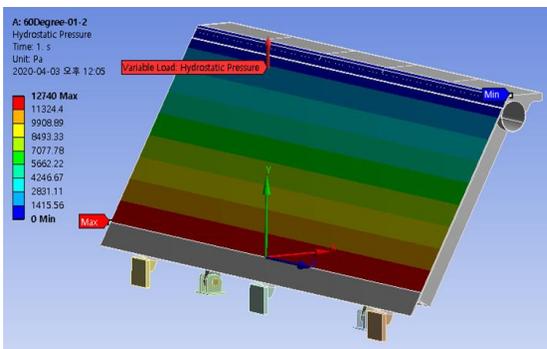


Fig. 5 Hydrostatic pressure applied to the surface of a movable weir

Table 2 Water depth and maximum pressure depending on the standing angle of the movable weir

| Standing angle (°)    | 60    | 45      | 30     | 15     |
|-----------------------|-------|---------|--------|--------|
| Water depth (mm)      | 1300  | 1060.7  | 750.6  | 388.5  |
| Maximum pressure (Pa) | 12740 | 10394.9 | 7355.9 | 3807.3 |

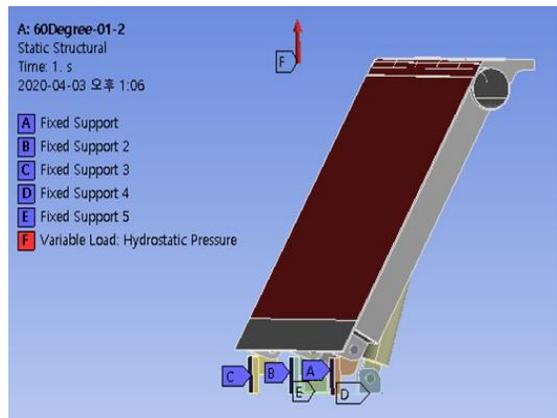


Fig. 6 Boundary conditions for the movable weir

Fig. 5는 지면과  $60^\circ$ 의 각도로 기립된 수문에 깊이에 따라서 압력을 다르게 적용하는 Hydrostatic Pressure가 적용된 것을 나타내고 있다. 가장 높은 곳인 수문의 상단이 Min으로 표시된 곳의 압력이 0이다. 이것은  $p = \gamma \cdot h$ 에서  $h = 0$ 이기 때문에 0으로 표시된 것이다. 그리고 가장 수심이 깊은 곳의 압력은  $\gamma = 9,800 \text{ N/m}^3$ ,  $h = 1.3 \text{ m}$ 가 적용되어 12,740 Pa의 압력이 적용되었다.

Table 2는 수문의 기립 각도에 따른 수심과 최고압력을 나타내고 있으며 Fig. 4와 잘 부합한다.

Fig. 6은 경계조건을 나타내 것으로서 청색으로 표시된 A~E까지의 5개는 Fixed Support로서 면 요소를 모든 방향으로 고정하고, 적색으로 표시된 F는 일반적인 압력(pressure) 조건과는 다르게 자유수면으로부터 수심에 따라 압력이 달라지는 압력 프리즘(pressure prism)효과를 적용시킬 수 있는 정수압(hydrostatic pressure) 경계조건이 적용되었다.

## 4. 메쉬(Mesh) 및 메쉬 의존성 테스트

나타내었다.

### 4.1 메쉬

유한요소 해석에서는 해석 대상의 기하학적 영역을 유한개의 작은 영역으로 분할한다. 이 분할된 요소를 유한요소(finite element)라 하고 요소망(mesh)은 이 분할한 것을 의미한다. 요소망은 요소번호와 절점 및 절점의 번호로 구성된 네트워크를 말한다. 요소망을 촘촘히 작성하면 이론적으로 매우 좋기는 하지만 컴퓨터의 계산시간 및 메모리 그리고 전단오차(truncation error) 등을 종합적으로 고려해야 한다. 본 해석에서는 적절한 수와 배치를 알기위해서 메쉬 의존성 테스트를 수행하였고, 그 결과를 Table 3와 Fig. 8의 그래프에 나타내고 있다.

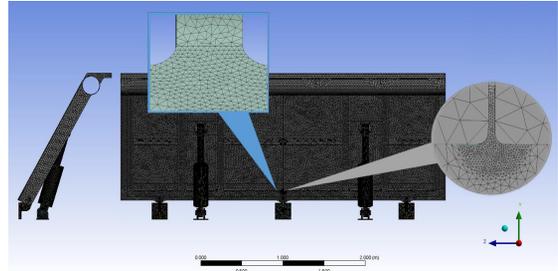


Fig. 7 Mesh

### 4.2 메쉬 의존성 테스트

Table 3은 총 6개의 경우에 대해서 계산한 결과이며 첫 열의 face, Hinge, Hydro, Plate는 도메인의 각 부위와 그 부위에 들어갈 요소망의 크기를 나타낸다. SOI는 Sphere of Influence의 약자로서 특정 위치(예를 들면 Fig. 7의 하단 중앙부)에 특별히 많은 요소망을 투자하게 할 수 있는 메쉬 작성 옵션이다. 여기서 R은 SOI 기법으로 메쉬를 넣을 때 적용할 범위를 나타내는 가상의 구 반지름 크기를 나타낸다. Node와 Element는 적용된 요소망의 노드(node) 수와 요소(element) 수를 나타낸다. 케이스의 번호가 증가할수록 늘어난다.

Table 3 Mesh dependency test

| No                       | case-0  | case-1  | case-2  | case-3  | case-4    | case-5    |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| face (mm)                | 10      | 10      | 10      | 10      | 10        | 10        |
| Hinge/Hydro (mm)         | 10      | 10      | 10      | 10      | 10        | 10        |
| Plate (mm)               | 20      | 20      | 20      | 20      | 20        | 20        |
| SOI (R=35mm)             |         | 3       | 2       | 1       | 0.5       | 0.25      |
| Node                     | 954,065 | 958,369 | 963,712 | 968,209 | 1,088,314 | 1,478,499 |
| Element                  | 553,259 | 555,631 | 558,814 | 573,221 | 632,728   | 864,543   |
| Deform (mm)              | 4.7635  | 4.7634  | 4.7635  | 4.7635  | 4.7636    | 4.7621    |
| $\sigma_{max}$ (MPa)     | 216.42  | 225.32  | 228.71  | 231.39  | 234.89    | 235.26    |
| $\sigma_{average}$ (MPa) | 154.87  | 171.06  | 199.15  | 214.98  | 233.06    | 234.87    |

$\delta_{max}$ 는 최대변형량을 나타내며, 이는 약 4.76 mm로 메쉬를 늘려도 거의 변화가 없었다. 그 이유는 유한요소해석에서 변위를 계산 후 이 변위를 이용해서 변형률을 계산하며 이를 후크 법칙(Hooke's law)을 이용해서 응력을 구하기 때문이다. 비교적 큰 변화는 요소망을 많이 투입한 곳의 응력인데  $\sigma_{max}$ 는 요소망의 수가 늘수록 증가하는 경향을 보였다.  $\sigma_{average}$ 는  $\sigma_{max}$  주위의 노드에서 응력값을 산술평균한 값이다. 해석 후 결과에서 노치부나 취약부에서 간혹 재료의 항복응력을 초과하는 부분이 나온다. 이 때  $\sigma_{average}$ 를 이용해서 취약부의 응력으로 삼으려고 Table 3의 맨 아래에

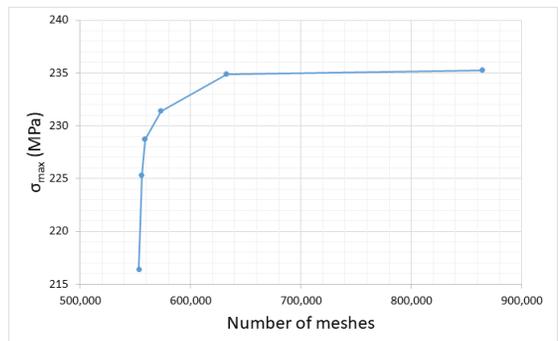


Fig. 8  $\sigma_{max}$  vs. number of meshes

Fig. 8은 각 도메인에서 가장 큰 응력이 걸리는  $\sigma_{max}$  값을 나타낸 이다. 여기서 응력은 Von Mises 응력이다. 비틀림 변형에너지설은 취성재료가 아닌 연성 재료에 적합한 설이다. 물체의 변형에너지는 체적의 변화를 일으키는 팽창 혹은 압축 변형에너지와 체적의 변화가 없는 비틀림 변형에너지로 나눌 수 있다. 비틀림 변형에너지 설은 비틀림 변형에너지가 어떤 값(항복강도)에 도달하면 재료가 소성변형을 일으킨다는 설이다. Von Mises 응력은 다음의 식에서 구할 수 있다.<sup>17)</sup> 본 보고서에서 언급하는 모든 응력은 Von Mises 응력이며 다음의 방정식은 이 응력을 구하는 계산식이다. Von Mises 응력은 계산식에서 보는바와 같이 제곱해서 근호를 씌웠기 때문에 모두 양의 값으로 표기된다.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Fig. 8은 case-0에서부터 case-5까지 총 6개의 경우에 대해서 계산한 결과이다. case-0은 초기 다른 유형에서처럼 SOI 옵션을 선택하지 않고 비교적 영성한 메쉬이며, case-1부터 case-5까지는 SOI 옵션을 사용해서 보다 조밀한 격자가 투입되었다. 그 래프 상에서 구배가 가장 큰이 case-0에서 case-1 사이인데 이는 격자의 조밀성에서는 오는 차이로 생각된다. 그 차이도 case-0에서 case-1의 구간이 약 4.1%로 가장 컸지만 다른 구간에서는 2%가 안 되는 작은 비율로 변하는 것을 알 수 있다. 그리고 더 이상의 계산은 의미가 없는 것으로 판단된다.

### 4.3 반력 계산

Fig. 5를 참고해서 전압력을 계산해 보자. 일단 벽면에 작용하는 힘은  $F = \gamma \cdot \bar{h} \cdot A$ 이고 수계산을 해 보면 37770.18 N이 되며 계산과정은 아래에 기술되었다. 여기서  $\gamma_{water}$ 는 물이 비중량이고,  $\bar{h}$ 는 수문의 도심에서 물의 자유표면까지의 수직거리이며, A는 수문의 면적 그리고 F는 수압에 의해 수문에 가해지는 전압력이다.

**Table 4 The reaction force acting on each support point and its combined force**

|             | FR-01  | FR-02  | FR-03  | FR-04 | FR-05 | SUM      |
|-------------|--------|--------|--------|-------|-------|----------|
| x-direction | -14763 | -37406 | -14767 | 17111 | 17116 | -32709   |
| y-direction | -14822 | -59351 | -14832 | 53947 | 53963 | 18905    |
| z-direction | 3.37   | -0.07  | -3.21  | -1.64 | 1.55  | -6.7E-05 |
|             |        |        |        |       |       | 37779.33 |

$$\gamma_{water} = 9800 \text{ N/m}^3$$

$$\bar{h} = 0.65 \text{ m}$$

$$A = 3.95 \times 1.50111 = 5.929 \text{ m}^2$$

$$F = \gamma \bar{h} A = 9800 \times 0.65 \times 5.929 = 37770.18 \text{ N}$$

다음으로 Fig. 6의 A, B, C, D 그리고 E에 해당되는 지지점인 Fixed support에서의 반력을 계산해서 테이블로 정리하면 다음과 같다. 이를 각 성분별로 모아서 다시 합력을 계산하면 37779.33 N이 된다.

공식에 의한 계산과 해석에 의한 계산의 차이의 절댓값은 9.15 N이다. 이는 전압력에 의한 하중의 약 0.024 %이므로 오차는 무시할 수 있으므로 해석에 의한 값을 신뢰할 수 있다.

## 5. 계산결과

Fig. 9 ~ Fig. 12는 기립각( $\theta$ )의 변화에 따른 변형량과 최대 응력을 그림으로 나타낸 것이다. 이를 수치적으로 정리한 것이 다음에 있는 Table 5이다. 표를 보는 법은 앞서 Table 3의 설명에서 이미 기술하였고 여기서 중요한 것은  $\sigma_{max}$ 인데 STS304의 항복응력은 앞의 Table 2에서 기술한바와 같이 330 MPa이며, 인장강도는 590 MPa이다.  $\sigma_{max, \theta=60^\circ} = 228.71 \text{ MPa}$ 이 최댓값이기 때문에 매우 보수적으로 안전계수(S)를 계산해도 약 2.58이다.<sup>17)</sup>

그리고 Fig. 13처럼 기립각이 60°와 45°에서는  $\sigma_{max}$ 가 수문의 뒷면에 있는 노치 부에서 나타났지만 기립각이 30°와 15°에서는  $\sigma_{max}$  값이 나온 곳이 힌지 부분 이었다. 이러한 결과의 원인은 기립각이 작아지면 수문에 작용하는 전압력이 급격히

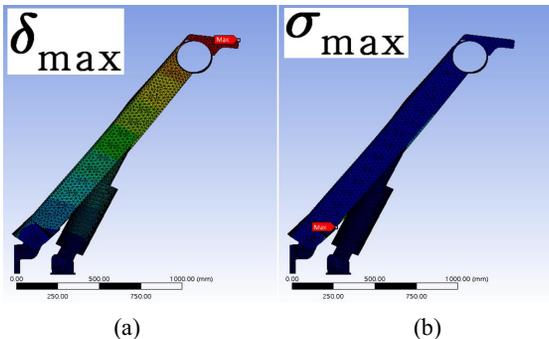
**Table 5 Analysis result according to standing angle change**

| Angle( ° )               | 60      | 45      | 30      | 15      |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Face                     | 10      | 10      | 10      | 10      |
| Hinge, Hydro             | 10      | 10      | 10      | 10      |
| Plate                    | 20      | 20      | 20      | 20      |
| SOI (R=35mm)             | 2       | 2       | 2       | 2       |
| Node                     | 963,712 | 962,441 | 958,849 | 959,641 |
| Element                  | 558,814 | 558,196 | 556,281 | 556,726 |
| $\delta_{max}$ (mm)      | 4.7635  | 3.2337  | 2.2574  | 1.3911  |
| $\sigma_{max}$ (MPa)     | 228.71  | 206.75  | 166.84  | 128.61  |
| $\sigma_{average}$ (MPa) | 199.2   | 158.2   | 151.6   | 93.1    |

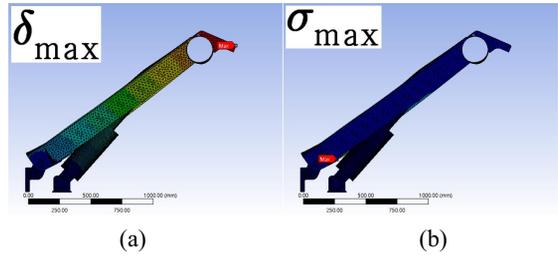
줄어들게 된다. 그 이유는 압력 프리즘 때문인데 수문에 작용하는 압력은  $p = \gamma \cdot h$ 가 되어서  $h$ 가 증가할수록 즉 수심이 깊어질수록 더 크게 작용하고,  $h$ 가 작아질수록 즉 수심이 얕아질수록 작게 작용하기 때문이다. 즉 수심이 얕은 경우 수문의 면에 작용하는 전압력 자체가 작아져서 수문을 휘는 정도가 급격히 줄어들었기 때문이다.

Table 5의 결과를 이용해서 안전계수(S)를 구할 수 있다.

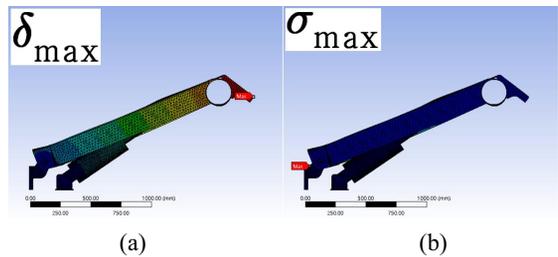
$$S = \frac{\sigma_u}{\sigma_{max}} = \frac{590}{228.71} = 2.57968606... \approx 2.58$$



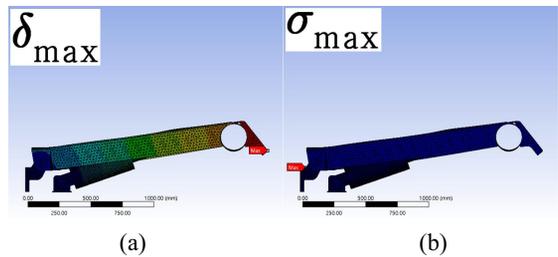
**Fig. 9 The strain(a) and maximum stress(b) at a  $\theta = 60^\circ$  to the movable weir**



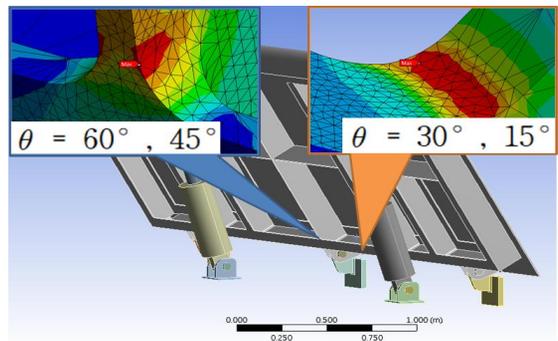
**Fig. 10 The strain(a) and maximum stress(b) at a  $\theta = 45^\circ$  to the movable weir**



**Fig. 11 The strain(a) and maximum stress(b) at a  $\theta = 30^\circ$  to the movable weir**



**Fig. 12 The strain(a) and maximum stress(b) at a  $\theta = 15^\circ$  to the movable weir**



**Fig. 13 Position of  $\sigma_{max}$  at each angle  $\theta$**

## 6. 결론

힌지결합 다용도 비상다리형 다단제어식 가동보의 정적 구조해석을 수행하였다. 하중은 기립각에 따른 정수압을 기준으로 인가했으며, 기립각에 따라서 최대 응력값이 발생하는 위치가 달랐다. 발생한 최대 응력값을 기준으로 안전계수를 산출했으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 기립각이 가장 큰  $60^\circ$ 에서 최대변형량( $\delta_{\max}$ ) 4.7635 mm와 최대응력( $\sigma_{\max}$ ) 228.71 MPa이 나왔으며 이는 가동보의 저장수량이 가장 많은 경우에 해당된다.
2. 기립각에 따라서 응력의 최댓값이 나오는 위치가 달라졌으며 이는 하중이 걸리는 위치와 힌지 사이의 거리 때문이다.
3. 안전계수(S)는 2.58로서 구조물로서 충분한 강성이 확보되었으며 안전하다고 판단된다.

## 후기

해석에 사용된 도면과 경계조건은 세광산업에서 제공한 것이며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Yeo, C.-g., Kim, Y. H., Seo, G. S., Song, J.-w., Yeo, C. G., Kim, Y. H., Seo, G. S. and Song, J. W., "The Study for Hydraulic Influence by Installing Movable Weir", KSCE 2009 Annual Conference, pp. 1452-1455, 2009.
2. Choi, J. W., Joo, H. J., Kim, J. M., Lee, K. S. and Yoon, S. J., "An Analytical Study on the Structural Performance Evaluation of the Multistage Overturing Movable Gate", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 25, No. 6, pp. 613-622, 2013.
3. Seo, G. W., Ko, D. S. and Ryu, G. S., "Case Study for gate vibration of the movable weir", Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 45-47, 2015.
4. Kim, K. W., Kwon, H. J., Kim, P. S. and Park, C. G., "Flexural and Interfacial Bond Properties of Hybrid Steel/Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Panel Gate with Steel Gate Surface Deformation for Improved Movable Weir", Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 57, No. 2, pp. 57-66, 2015.
5. Ahn, J. M., Jung, K. Y., Shin, D. S. and Lyu, S. W., "Analysis of Flow and Bed Changes by Hydraulic Structure using CCHE2D : Focusing on Gangjeong-Goryeong Weir", Journal of Wetlands Research, Vol. 19, No. 2, pp. 181-192, 2017.
6. Choi, G. W., Kim, Y. K., Cho, S. W. and Kim, J. Y., "Variation of Water Elevation by Setting Angle of Movable Weir", KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS 2006 Annual Conference, pp. 2662-2665, 2006.
7. Daryl, L. Logan, First course in the FINITE ELEMENT METHOD, Cengage Learning, pp. 357-367, 398-405, 2017.
8. Cho, H. K., "Thermal Impact Evaluation on Buckling of Cylindrical Structures Using Shell Elements", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 7~15, 2021.