

HVDC의 지지조건에 따른 지진 응답 특성 분석

Seismic Response Analysis according to Support Conditions for HVDC

임 기 정* · 이 정 준* · 윤 재 광* · 박 동 희** · 최 병 근†

Gi-Jeong Im*, Jeong-Jun Lee*, Jae-Gwang Yoon*,
Dong-Hee Park** and Byeong-Keun Choi†

(Received August 9, 2024 ; Revised September 20, 2024 ; Accepted October 8, 2024)

Key Words : Ground-mounted(직립식), Suspended(현수식), Seismic Response(지진응답), Response Spectrum(응답스펙트럼), Transient Structural(과도해석)

ABSTRACT

Recently, with the increasing frequency and intensity of earthquakes in South Korea, the country can no longer be considered a safe zone. In regions where earthquakes are more frequent, suspended models with low seismic responses are commonly used to enhance the seismic performance of high-voltage direct current(HVDC) systems. However, in South Korea, ground models that are directly mounted on the floor have traditionally been installed. Therefore, this study aims to evaluate the applicability of suspended models by comparing the seismic responses of various support types. To facilitate this comparison, a response spectrum analysis was conducted for the ground-mounted model, while a transient analysis was performed for the suspension-type model in accordance with IEEE-693 standards. Additionally, a spring-damper system was applied to the suspended model to improve its efficiency, and the associated damping effects were analyzed. These findings are anticipated to lay the groundwork for evaluating the internal performance of HVDC facilities.

1. 서 론

HVDC(high-voltage direct current)는 발전소에서 생산된 교류 전력을 직류로 변환시켜 송전하는 시스템으로, HVAC(high-voltage alternating current)에 비해 충전전류가 발생하지 않고 장거리 송전에 이점이 있어 국내에 널리 사용되고 있는 전력 설비이다⁽¹⁾. 이러한 설비는 대용량 전력을 공급하기 때문에 고장이 발생하면 실생활에서 불편함을 초래할 뿐만 아니라,

발전소와 플랜트 등 다양한 산업 분야에 심각한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 또한, 전력 공급이 중단되면 복구 작업이 어려워져 대규모 정전과 같은 2차 피해가 발생할 우려가 있다⁽²⁾.

최근 국내에서 발생한 5.0 이상의 지진은 관측 이래 가장 큰 피해를 기록하였으며, 지진 발생 주기와 강도가 점차 증가하고 있다. 지진의 안전지대라고 여겨졌던 우리나라도 지진 재해를 무시할 수 없는 수준으로 평가되고 있다⁽³⁾. 따라서, 전력 설비뿐만 아니라 주택과 아파트 등 일반 건물에서도 내진 설계가 이루어

† Corresponding Author ; Member, Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Professor
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

* Member, Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Student

** Daviss, Researcher

A part of this paper was presented at the KSNVE 2024 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Hanshin Seol

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

어지고 있다. 특히, 정부 주도하에 이루어지고 있는 전력계통 혁신대책의 핵심 설비인 HVDC 시스템은 내진 설계와 안정성 평가가 필수적으로 요구되고 있다^(4,5). 이러한 문제를 해결하기 위해 지진 발생 빈도가 높은 유럽과 중국에서는 HVDC의 내진 안정성을 강화하기 위해 rod와 hanger 등을 활용하여 건물의 천장에 매다는 현수식 구조로 제작하는 추세이다⁽⁶⁾.

현수식 구조는 지진 하중이 건물의 천장부로 전달되면서 대상 모델에 가진을 하는 형태이기 때문에 지면에서 바로 가진 되는 직립식 구조보다 지진에 의한 진동 응답이 낮아 내진 안정성이 더 우수하다고 평가되고 있다⁽⁷⁾. 반면, 국내에 설치된 HVDC 설비는 대부분 직립식 구조이므로, 국내에서도 현수식 모델의 도입 가능성을 평가하기 위한 연구가 필요하다. 이러한 각 구조의 내진 성능 비교 분석은 국내 HVDC 설비의 내진 성능 평가 지표에 대한 기초 연구로써 활용될 수 있다.

HVDC 설비의 지지 형태에 따라 직립식, 현수식 모델의 내진 성능 및 안정성을 비교 분석하기 위해서는 지진파에 대한 응답 해석이 수행되어야 한다. 따라서, 이 연구에서는 직립식 모델에 대해 내진해석에서 주로 사용되는 응답 스펙트럼(response spectrum) 해석을 수행하였다. 또한, 현수식 모델은 내진 성능 평가에 과도해석의 결과를 반영하는 것이 적합하다고 권장하기 때문에 과도해석을 수행하였다. 각 내진해석 결과를 토대로 부품별 발생하는 최대 변위와 등가 응력을 대상으로 비교하였다. 또한, 현수식 모델에 담퍼 시스템을 적용하여 그 효과를 비교 분석하였다.

2. 해석 조건 및 방법

2.1 해석모델 및 경계조건

Fig. 1은 HVDC의 구조를 나타낸 그림으로, 층마다 전압형 컨버터 모듈(voltage source converter module, VSCM)과 절연체, shield, hinge 등으로 구성되어 있다. 모듈은 프레임과 절연빔으로 지지되어 있고 각 층 사이를 절연애자로 연결하고 있는 구조이다⁽⁸⁾. Fig. 2는 지지된 형태에 따라 HVDC를 모델링한 그림으로, Fig. 2(a)는 지면에 고정된 직립식 모델을, Fig. 2(b)는 천장에 매달려 있는 현수식 모델을 나타낸다. 강성이 미미하게 작용하는 부품은 제외하고 프레임과 절연체로만 이루어진 해석모델을 생성하였다. VSCM의 경우 형상이 복잡하여 모델링을 수행하지 않고 point-mass

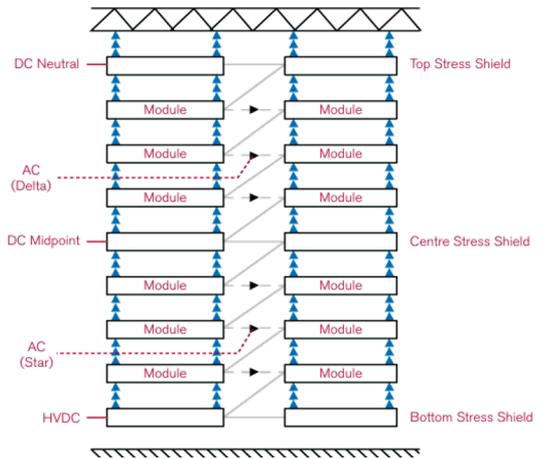
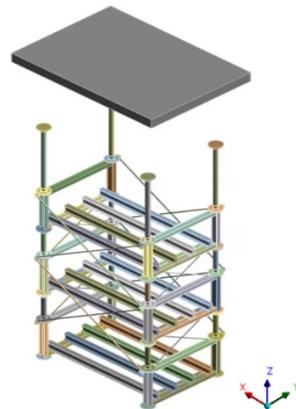


Fig. 1 HVDC for 285 kV application



(a) Ground model



(b) Suspend model

Fig. 2 Analysis model

기능을 사용하여 해석 시 질량 효과만 고려하였다. 프레임 재질은 탄소강(SS275), 절연애자와 절연빔은 유리섬유 강화플라스틱(FRP, fiberglass reinforced plastic)으로 설정하였고, 재질에 대한 상세 정보는 Table 1에 나타내었다^(9,10). 각 모델의 절점 및 유한요소 개수는 Table 2에 나타내었으며, 현수식 모델의 경우 직립식 모델과 달리 천장 부분에 대한 모델이 추가되기 때문에 절점과 요소의 수가 약 10%가 많다.

VSCM의 무게를 고려하기 위해 point-mass가 층마다 적용되었고, -Z 방향으로 중력이 적용되었다. Fig. 3은 각 모델의 경계조건을 나타낸 그림이며, Fig. 3(a)은 직립식 모델로 바닥 면 4지점을 fixed support로 설정하였고 Fig. 3(b)은 현수식 모델로 천장부를 fixed support로 설정하였다. 또한, 현수식 모델의 경우, 천장과 상부 절연애자 연결부 사이의 경계조건은 병진 방향이 구속되고 회전 방향은 구속되지 않는 spherical joint 형태로 설정하였다.

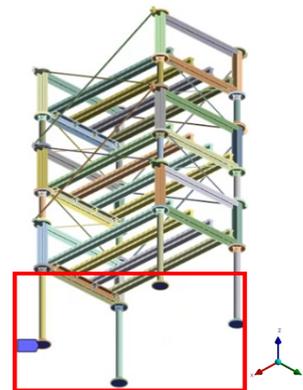
2.2 내진해석 방법

내진해석의 대표적인 방법으로는 응답 스펙트럼 해석과 과도해석이 있다. 응답 스펙트럼 해석은 해당 지진파의 주파수별 최대 응답을 추출한 가속도-주파수 스펙트럼을 가진하여, 각 모드에 대한 최대 변위, 응력을 근사적으로 계산하는 방법이다. 이 방법은 지진파의 최대 응답을 비교적 빠르고 간편하게 추출할 수 있는 이점이 있어 내진해석에서 주로 사용된다⁽¹¹⁾.

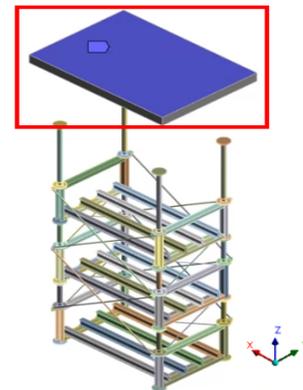
과도해석은 지진파의 시간 이력을 가진하여, 각 모드에 대한 응답을 뉴마크 시간 적분법(newmark time integration method, NTIM)으로 계산하는 방법이다⁽¹²⁾. 이 방법은 매 순간 변하는 구조물의 응답을 계산할

수 있는 이점이 있어 시간에 따라 거동 범위가 넓은 형상에 한하여 과도해석을 수행한다. 따라서, 직립식 모델의 경우 해석 시간 단축을 위해 응답 스펙트럼 해석을 수행하였고 현수식 모델은 직립식 모델과 달리 천장에 매달려 있어 흔들리는 거동 범위가 넓기 때문에 과도해석을 수행하였다.

또한, 두 해석 방법 모두 모드중첩법(mode superposition method, MSUP)을 사용하기 때문에 내진해석 수행 전 모달 해석이 선행되어야 한다. 내진해석 시 전체 모드의 영향을 고려하도록 요구하고 있지만, HVDC와 같은 큰 구조물의 경우 모든 질량과 강성을 포함한 고유 모드를 추출하기에는 무리가 있으므로 보정이 필요하다. 추출된 모드의 질량 참여계수가 0.9 아래일 경우 Fig. 4와 같이 응답 스펙트럼 상에서 가진 주파수 영역의 영주기가속도(zero period acceleration, ZPA)까지 모드를 추출한 후 응답 스펙트럼 해석의



(a) Ground model



(b) Suspend model

Fig. 3 Boundary condition

Table 1 Materials properties

| Material | Density [kg/m ³] | Young's modulus [MPa] | Poisson's ratio | Yield strength [MPa] |
|----------|------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| SS275 | 7850 | 200 000 | 0.3 | 275 |
| FRP | 2100 | 300 000 | 0.4 | 805 |

Table 2 Number of node and element

| HVDC model | Node | Element |
|------------|---------|---------|
| Ground | 124 521 | 32 150 |
| Suspend | 132 090 | 39 923 |

missing mass effect, 과도해석의 residual vector 등의 방법으로 고차모드에 해당하는 잔여 모드 응답을 산출하여 질량 및 강성이 보정되어야 한다⁽¹³⁾.

2.3 내진 해석 하중조건

하중조건으로는 IEEE-693에서 제시하는 대형전력

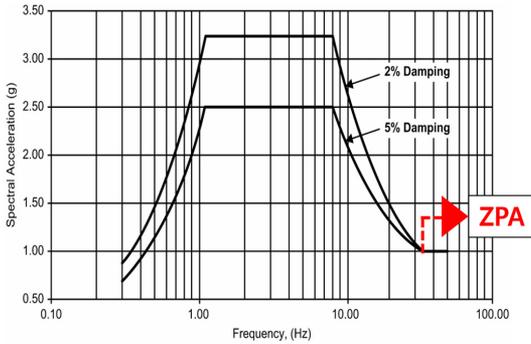
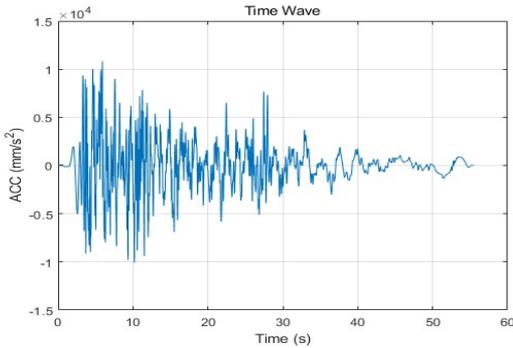
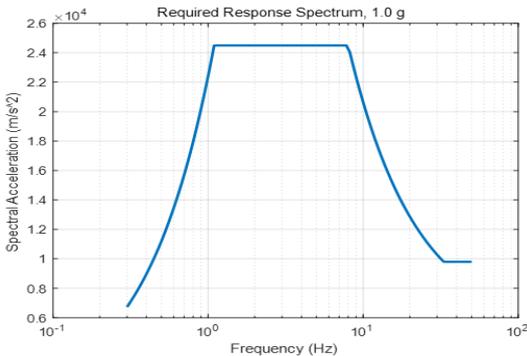


Fig. 4 ZPA of response spectrum



(a) Time waveform



(b) Response spectrum

Fig. 5 Input data

설비 설계 기준 지진 등급을 선정하여 가진력으로 활용하였다. Fig. 5(a)는 지진파(EI-Centro;1940)의 시간 파형을 나타낸 것이며, Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)를 기반으로 나타낸 응답 스펙트럼 그래프이다. 감쇠비는 SSE (safety shutdown earthquake) 기준인 5%를 적용하였으며, 지진파, 입력 방향, 감쇠비 등 두 해석 방법은 동일한 조건으로 선정하였다.

현수식 모델의 가진력은 천장부에 대한 응답이 필요하므로, Fig. 6과 같이 천장 지지부에 대한 시간 이력을 구하는 방법을 나타내었다⁽¹⁴⁾. 현수식 모델은 hall과 결합된 구조로 함께 해석을 수행하게 되면 많은 시간과 비용이 소요되므로 지면에 지진파를 가진하여, 지지된 층에 대한 응답을 추출하는 방법이 필요하다. 따라서, 실제 HVDC가 설치된 hall 구조물을 beam 요소로 모델링 후 해석을 수행하였다⁽¹⁵⁾. 지진파를 hall의 바닥에 입력하여 과도해석을 수행한 다음, HVDC 지지부의 응답을 현수식 모델의 가진력으로 활용하였다. 지지부의 응답이 실제 지진파보다 약 2배 높게 발생하였으며, 이는 hall 건물에서 강성의 취약부 및 구조적 특성에 의해 진동에너지가 증폭된 것으로 판단된다⁽¹⁶⁾.

3. 내진해석 결과

3.1 직립식 모델 해석결과

모달 해석은 지진파 스펙트럼의 영주기 가속도가 시작되는 구간인 33 Hz까지 수행하였으며, Fig. 7에 전체 모드를 추출한 결과를 나타내었다. 총 35개의

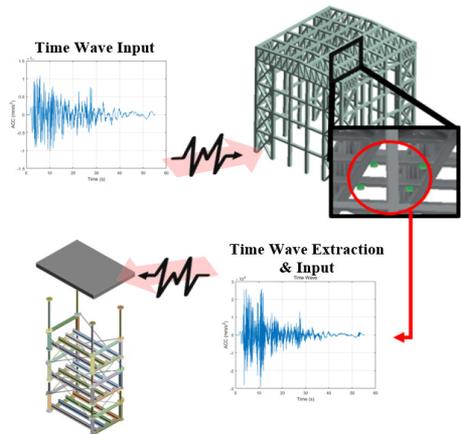


Fig. 6 Time wave extraction process

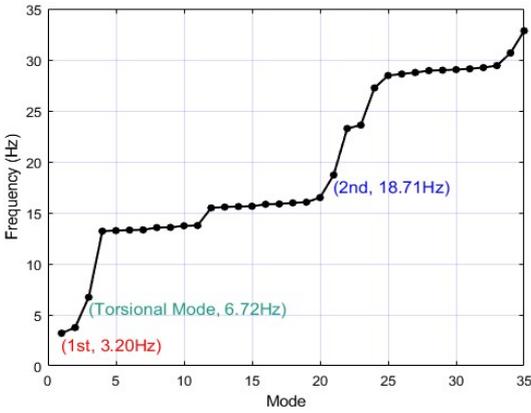


Fig. 7 Mode extraction result

모드 중, 굽힘 및 비틀림 모드를 제외한 29개의 모드에서 local 모드가 있는 것을 확인하였다. Fig. 8은 추출된 35개의 모드 중 1차, 2차 굽힘 모드를 나타낸 그림으로 각각 3.2 Hz, 18.7 Hz이다. 33 Hz 이하에서 2차 모드까지만 발생하므로, 고주파 영역의 잔여 모드 영향을 포함하기 위해 missing mass 기법을 적용하여 내진해석을 수행하였다⁽¹⁷⁾.

Fig. 9는 직립식 모델의 내진해석 결과를 나타낸 그림이다. VSCM을 지지하고 있는 부품 위주로 최대 등가 응력과 최대 변위를 확인하였다. 부품별 최대 등가 응력은 프레임 1086.9 MPa, 절연체자 161.7 MPa, 절연빔 100.2 MPa이며, 프레임에서 재료의 항복강도보다 811.9 MPa 높게 발생한다. 이는, 직립식 모델의 구조

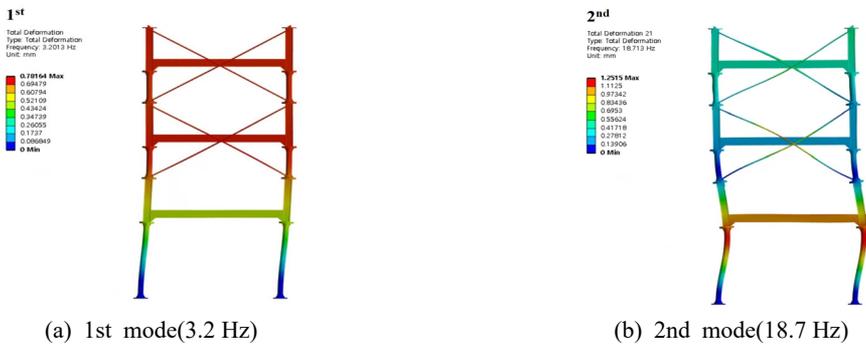


Fig. 8 Mode shape of ground model

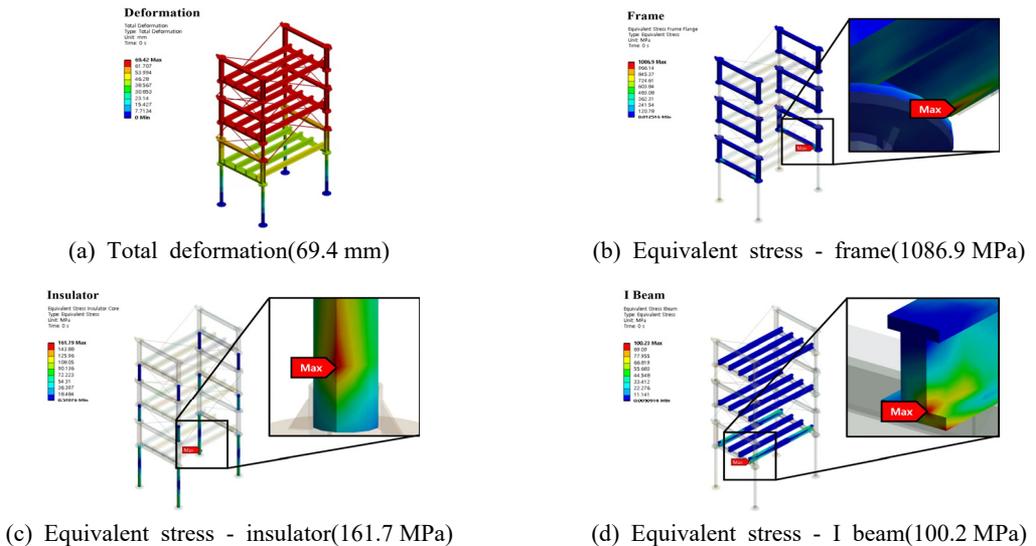


Fig. 9 Result of ground HVDC

적 특성상 프레임과 플랜지에서 접합되는 부분의 면적이 차이가 나기 때문에 지렛대의 원리로 인해 응력이 과도하게 집중된 것으로 판단된다⁽¹⁸⁾. 최대 변위는 69.4 mm이며, HVDC의 특성상 여러 대의 설비가 한 공간에 설치되기 때문에 설치 수, 건물 면적 등 적용할 수 있는 변위 간격을 검토하기 위해 최대 변위를 확인하였다.

3.2 현수식 모델 해석결과

현수식 모델도 고유 진동 모드를 33 Hz까지 추출하였으며 Fig. 10에 전체 모드를 추출한 결과를 나타내었다. 총 41개의 모드 중 굽힘, 비틀림 모드를 제외한 35개의 모드에서 local 모드가 있는 것을 확인하였다. Fig. 11은 추출된 41개의 모드 중 1차, 2차 굽힘 모드의 형상을 나타낸 그림으로 각각의 주파수는 2.7 Hz, 16 Hz이다. 직립식 모델과 비교하였을 때, 2 Hz 내외로 다소 차이가 발생하지만, 최대 변위 발생 위치가 유사한 것을 알 수 있다. 따라서, 33 Hz 이후 잔여 모드에 대한 응답은 residual vector를 적용하여 내진해석을 수행하였다.

Fig. 12는 현수식 모델의 내진해석 결과를 나타낸 그림이다. 최대 변위는 89.3 mm로 직립식 모델보다 20.1 mm 증가하지만, 부품별 최대 등가 응력은 프레임 230.6 MPa, 절연애자 190.5 MPa, 절연빔 18.5 MPa로 모두 재료의 항복강도를 넘지 않는 수준이다. 하지만, 직립식 모델보다 절연애자 부품의 응력과 변위가 증가한 것을 확인하였다. 이는, 현수식 모델의 구조적 특성으로 인해 가진 시 진동에너지가 상승하고 그 결과 모듈 사이를 이어주는 절연애자의 응력과 변위가 증가한 것으로 판단된다.

현수식 모델의 경우, 지진 하중에 의한 응답 변위가 넓으므로 HVDC를 설치하였을 때, 설비 사이의 간격이 확보되어야 한다. 하지만, HVDC 특성상 여러 대의 설비가 한 공간에 설치되기 때문에 지진 하중에 의한 응답 시 설비 간의 간섭을 방지하기 위해 과도한 수평 변위를 줄이는 것이 필요하다. 따라서, 현수식 모델의 하부를 구속하는 spring 경계조건을 추가로 부여하여 해석을 수행하였다. 스프링 댐퍼의 압축력을 최소화하기 위해 강성과 댐핑값을 각각 200 N/mm, 100 N·s/mm로 선정하였다⁽¹⁵⁾.

Fig. 13은 스프링 댐퍼가 추가된 현수식 모델의 내진 해석 결과를 나타낸 그림이다. 최대 변위가 59.9 mm로 감소하고, 부품별 최대 등가 응력은 프레임 211.2 MPa,

절연애자 190.2 MPa, 절연빔 18 MPa로 가장 낮은 응력임을 확인하였다.

3.3 해석 결과 비교

직립식, 현수식 모델과 하부에 스프링 댐퍼가 추가

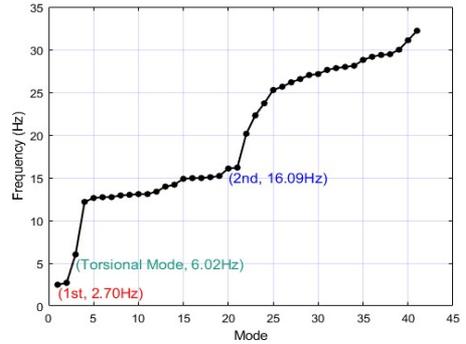
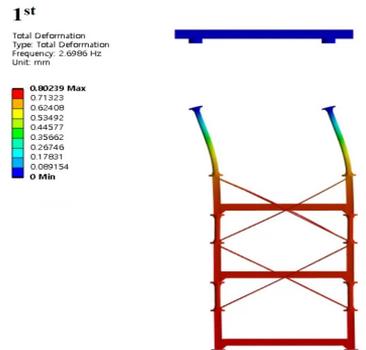
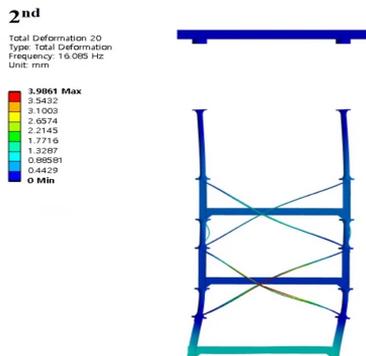


Fig. 10 Mode extraction result



(a) 1st mode [2.7 Hz]



(b) 2nd mode [16 Hz]

Fig. 11 Mode shape of suspend model

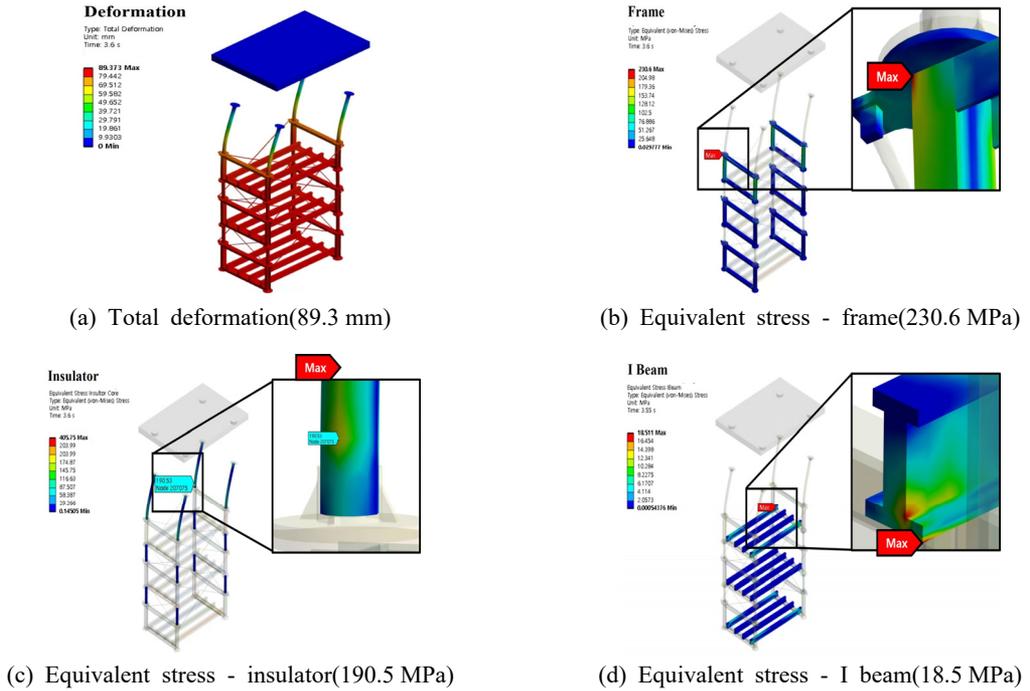


Fig. 12 Result of suspend HVDC

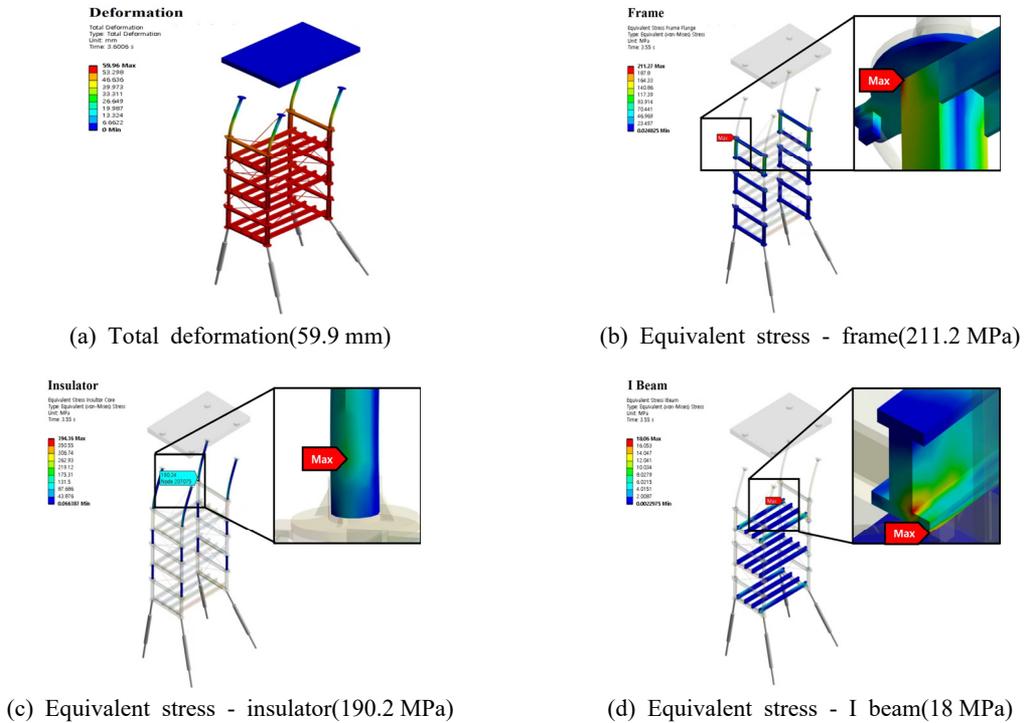


Fig. 13 Result of suspend HVDC(spring-damper)

Table 3 Seismic analysis result of HVDC

| HVDC model | Total deformation [mm] | Equivalent stress [MPa] | | |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|-----------|--------|
| | | Frame | Insulator | I beam |
| Ground | 69.4 | 1086.9 | 161.7 | 100.2 |
| Suspend | 89.3 | 230.6 | 190.5 | 18.5 |
| Suspend (spring-damper) | 59.9 | 211.2 | 190.2 | 18 |

된 현수식 모델로 총 3가지 case에 대한 지진의 응답 특성을 비교 분석하였다. Table 3에 모델별 최대 변위와 각 부품의 최대 등가 응력을 나타내었으며, 현수식 모델은 직립식 모델보다 프레임과 절연빔에 작용하는 등가 응력이 각각 79%, 82% 감소하는 것을 확인하였다. 이는, 프레임(SS275)의 항복강도(275 MPa)를 만족하는 수준으로 확인된다. 직립식 모델보다 현수식 모델의 안정성이 우수한 것으로 판단된다.

하지만, 현수식 모델의 최대 변위와 절연애자에 작용하는 응력이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 구조의 특성상 천장에 joint로만 지지되어 있고 VSCM이 층마다 절연애자 4개로만 연결되어 있으므로 바닥에 지지되는 직립식 모델보다 지지부의 강성이 낮아 거동이 크게 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 현수식 모델에 스프링 댐퍼를 추가하여 모델링하였으며, 스프링 댐퍼가 없는 현수식 모델과 비교 분석하였다. 최대 변위와 부품별 등가 응력이 전체적으로 감소한 것을 확인하였으며, 이는 스프링 댐퍼가 지진파에 의한 응답과 응력을 전체적으로 감소시키는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 현수식 모델이 직립식 모델보다 설비에 받는 지진에 의한 응답이 낮아지며, HVDC 설비가 다수로 설치된다는 점을 고려하였을 때, 스프링 댐퍼를 추가하는 것이 적합하다고 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 HVDC를 대상으로 지지된 형태에 따라 직립식, 현수식 모델로 나누어 지진파에 의한 응답을 해석하여, 발생하는 변위와 등가 응력을 비교 분석하였다. 현수식 모델의 안정성을 높일 수 있는 스프링 댐퍼를 추가 모델링하여 해석 결과를 비교하였다.

현수식 모델은 직립식 모델보다 프레임과 절연빔에 대한 등가 응력이 약 80% 정도 낮으며, 절연애자 부품에

대한 응력은 높았지만 타 부품과 비교하였을 때, 높은 수준은 아닌 것으로 확인된다. 하지만 해석 결과상 현수식 모델의 하부 최대 변위가 89.3 mm로 큰 거동이 발생하였으며, 이는 상부 joint만으로는 구속 시스템이 부족하다고 판단된다. 현수식 모델 하부에 스프링 댐퍼를 추가하여, 해석 결과를 비교하였다. 결과적으로 스프링 댐퍼가 추가된 현수식 모델의 최대 등가 응력이 가장 낮았으며, 응답의 최대 변위는 59.9 mm 임을 확인하였다.

모델별 최대 등가 응력과 변위 비교를 통해 국내 HVDC 내진 성능 평가 지표 및 설계 변경 시 요구되는 기초 연구를 수행하였다. 하지만 최대 등가 응력을 효과적으로 감소시킬 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 해석 결과를 토대로 상부 joint, 절연애자, 하부 스프링 댐퍼에 대한 구속조건 등 강성에 영향을 미치는 요소를 최적 설계하면 우수한 안정성을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- (1) Mun, S. P. and Choe, J. Y., 2015, Voltage-type HVDC Market Outlook and Technology Development Status, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 64, No. 6, pp. 8~15.
- (2) Goodno, B. J., Gould, N. C., Caldwell, P. and Gould, P. L., 2011, Effects of the January 2010 Haitian Earthquake on Selected Electrical Equipment, Journal of Earthquake Spectra, Vol. 27, No. 1, pp. 251~276.
- (3) Heo, J. W., Kim, S. H., Son, H. M., Jo, H. M. and Choi, W. S., 2017, A Study on Policy Direction for Earthquake Disaster Response in Gyeonggi-do, Policy Research 2017-09, Gyeonggi Research Institute, Suwon, Korea.
- (4) So, G., 2017, A Study on the Seismic Response Estimation of Cabinet Typed Electrical Equipment, Doctoral Dissertation, Kunsan National University, Gunsan, Korea.
- (5) Moon, J. H., 2024, Introduction to the Earthquake Design Standards and Certification Test Guidelines for Transmission and Distribution Facilities, Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 24, No. 1, pp. 4~10.
- (6) Jeon, B.-G., Jung, C.-Y., Jin, J.-W., Kim, H.-H. and Cheung, J.-H., 2015, Seismic Performance Evaluation of 500kV EBA, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 496~502.
- (7) Larder, R. A., Gallagher, R. P. and Nilsson, B., 1989, Innovative Seismic Design Aspects of the Intermountain

Power Project Converter Stations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1708–1714.

(8) Alstom, 2010, HVDC for Beginners and Beyond, Alstom Saint-Ouen, France, pp. 1~92.

(9) ASME, 2020, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II: Part D(metric), The American Society of Mechanical Engineers, NY, United States.

(10) IEEE, 2019, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std. 693-2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8686442.

(11) Han, S. U., Ahn, J. T., Lee, K. C. and Han, S. H., 2012, Theoretical Seismic Analysis of Butterfly Valve for Nuclear Power Plant, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 36, No. 9, pp. 1009~1015.

(12) Byun, C. H., Lee, H. G. and Kim, J. Y., 2021, Consideration of Residual Mode Response in Time History Analysis using Residual Vector, Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, Vol. 17, No. 2, pp. 137~144.

(13) Kim, S. I., 2021, Evaluation of Structural Integrity and Cooling Performance of 4250 kVA ONAN Power Transformer, M.S. Thesis, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea.

(14) Jiang, W., Li, B., Xie, W.-C. and Pandey, M. D., 2015, Generate Floor Response Spectra: Part 1. Direct Spectra-to-spectra Method, Nuclear Engineering and Design, Vol. 293, pp. 525~546.

(15) Yang, Z., Xie, Q., Zhou, Y. and Mosalam, K. M., 2018, Seismic Performance and Restraint System of Suspended 800 kV Thyristor Valve, Engineering Structures, Vol. 169, pp. 179~187.

(16) Shreyasvi, C., 2015, Seismic Vulnerability of RC Frames with Re-entrant Corners, M.S. Thesis, Visvesvaraya Technological University, Belagavi, India.

(17) Chung, C. S., 2010, Seismic Evaluation of Structural Integrity of Main Cooling-water Pump by Response Spectrum Analysis, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 34, No. 11, pp. 1773~1778.

(18) Cheng, X. H. and Ma. F., 2013, Beam Frame Supported Shear Wall Structure Based on the ANSYS Finite Element Static Analysis of Beam-type Transfer Floor, Advanced Materials Research, Vol. 788, pp. 508~510.



Gi-Jeong Im is unified Master's Course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the rotor and machine fault analysis.



Jeong-Jun Lee is Doctor's Course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the rotor and machine fault analysis.



Jae-Gwang Yoon is unified Master's Course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the rotor and machine fault analysis.



Dong-Hee Park received his Ph.D. degree in Energy and Mechanical Engineering from Gyeongsang National University. His areas of research are dynamic analysis of the rotor and machine fault analysis. He is a CEO at the Daviss Corp. in Korea.



Byeong-Keun Choi is a Professor at the Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University in Korea. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pukyong National University, Korea, in 1999. From 1999 to 2002,

Dr. Choi worked at Arizona State University as an academic researcher. Dr. Choi's research interests include vibration analysis and optimum design of rotating machinery, machine diagnosis and prognosis and acoustic emission. He is listed on Who's Who in the World, among others.