

점탄성감쇠기를 이용한 송전철탑 풍하중의 저감

Wind Load Mitigation for Transmission Tower using Viscoelastic Damper

민경원* 박지훈** 문병욱***
Kyung-Won Min Ji-Hun Park Byoung-Wook Moon

Key Words : 송전철탑(Transmission Tower), 풍하중(Wind Load), 회전형 점탄성감쇠기(Rotational Viscoelastic Damper)

ABSTRACT

In this study, the wind load characteristics for a transmission tower is investigated considering the effect of the transmission lines through stochastic analysis. The assemblage of the transmission line and insulator are modeled as a double pendulum system connected to the SDOF model of the tower. It is observed that the background component of the overturning moment induced by the wind response of the transmission line has considerable portion in the total overturning moment. Based on this result, a rotational viscoelastic damper (VED) is proposed for the mitigation of the transmission line reactions, which act as wind load transferred to the tower. To verify the effectiveness of the proposed strategy, time history analysis is conducted for different wind velocities and VED damping constants. From the analysis, the proposed VED is proved to be effective for mitigation of the background component rather than the resonance component of the transmission line reaction.

1. 서 론

최근 들어 태풍 등의 강한 풍하중에 의해 송전철탑이 붕괴되는 사고가 발생하고 있다. 이는 설계하중보다 큰 풍하중이 작용한 데서 기인한다고 볼 수 있겠으나 풍하중의 동적 특성과 구조물에 대한 영향이 보다 면밀히 파악되지 못한 데서도 그 원인을 찾을 수 있다. 송전철탑에 작용하는 풍하중은 크게 철탑 본체에 작용하는 하중과 전선에 작용하는 하중으로 분류할 수 있으며 각각의 풍하중은 공진성분과 비공진 성분으로 세분된다. Holmes는 풍하중에 대한 추계학적 연구를 통해 격자형(lattice) 구조물의 풍응답은 상층부로 갈수록 공진성분의 영향이 큼을 보였다. Momomura 등은 실측을 통해 송전철탑의 풍응답 특성을 파악하였으며 전선이 연결됨으로써 송전철탑-전선 통합구조물의 감쇠가 증가함을 관찰하였다. 반면에 Yasui 등은 전선이 바람과 상호작용하여 발생하는 공기역학적 감쇠(aerodynamic damping) 및 전선에 작용하는 장력의 효과를 고려한 동적해석을 통해 송전철탑의 풍응답 특성을 파악하였다. 또한 Battista 등은 동적해석을 위한 전선의 모델

링 방법과 송전철탑의 풍응답 특성에 관한 연구를 수행하였으며 진자형 동조질량형 감쇠기를 사용한 동적응답 저감 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 먼저 송전철탑의 풍응답에 대한 전선의 영향을 포함하여 송전철탑의 응답특성을 검토하고 전선에 의해 전달되는 하중의 영향을 저감하기 위한 방안으로서 송전철탑과 전선 사이에 회전형 점탄성감쇠기를 설치하는 방안을 제시하고 수치해석을 통해 그 효과를 검증하도록 한다.

2. 송전철탑 및 풍하중 모델링

송전철탑의 풍응답은 낮은 진동수 대역이 지배적인 풍하중의 특성상 최저차 모드가 지배하게 된다. 또한 전선의 풍응답 역시 풍하중의 진동수 특성상 저차의 모드가 지배적이 된다. 따라서 본 연구에서는 송전철탑을 단자유도 진동계로 모델링한다. 또한 전선은 애자의 영향을 고려하기 위해서 그림 1과 같이 직렬연결된 진자로 가정하여 결과적으로는 2자유도의 진동계로 모델링하였으며 애자의 길이를 조절하여 현수형과 내장형 송전철탑을 구분하여 모델링하였다. 개개의 전선-애자 시스템은 송전철탑에 병렬연결된 것으로 가정하여 그림 1과 같이 통합 구조물을 모델링하였다. 사용된 풍하중의 파워스펙트럼밀도는 Davenport가 제

* 단국대학교 건축대학 부교수

** 단국대학교 내진리모델링센터, 연구진입장사

*** 단국대학교 건축대학 석사과정

안한 식을 사용하였으며 그림 2에 나타내었다.

대상 송전철탄은 그림 3과 같으며, 154kV 급으로서 높이가 55.7 m이고 가공지선은 높이 55.7에, 전선은 높이 철탄암은 높이 30, 34.3, 38.1, 42.6, 46.4, 50.7 m마다 좌우 2개씩 설치된 것이다. 또한 전선이 복수 전선의 다발로 구성된 경우가 많기 때문에 하나의 전선 다발을 구성하는 전선 개수가 1, 2 및 4개인 경우로 나눠 해석을 수행하였다.

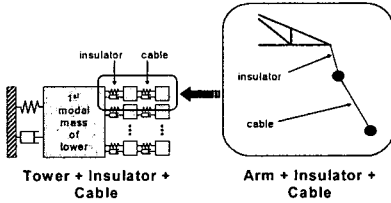


그림 1 송전철탄과 전선의 모델링

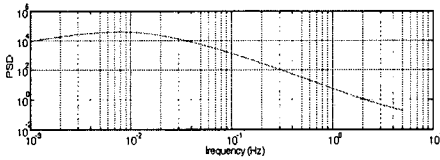


그림 2 풍하중의 파워스펙트럼 밀도

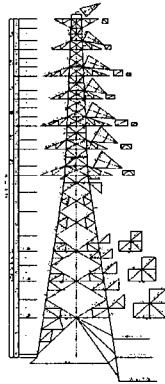


그림 3 해석 대상 송전철탄

3. 송전철탄의 풍응답

일반적으로 송전철탄의 거동은 캔틸레버 보에 가깝고 주주재의 축방향 부재력이 풍하중과 평형을 이루면서 저항하게 된다. 따라서 철탄 본체에 작용하는 전도모멘트가 철탄의 안전성과 관계된 중요한 응답이며 그림 3과 같은 송전철탄 및 식 (1)과 같은 풍하중을 대상으로 철탄 본체에 작용하는 전도모멘트를 높이별로 계산하여 그림 4 및 5에 나타내었다. 비공진 성분인 경우에는 풍압과 수평면적에 비해

하는 정적하중에 가까운 특성을 가지므로 철탄본체와 전선을 분리하여 계산하였다. 반면에 공진성분의 경우에는 철탄본체와 전선 사이에 상호작용이 있을 수 있으므로 앞서 그림 1에 나타낸 통합구조물을 대상으로 해석을 수행하였다.

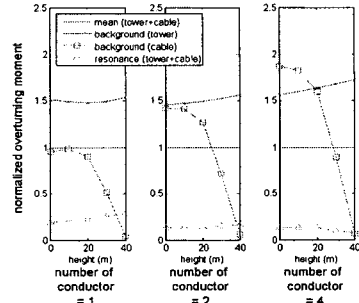


그림 4 정규화된 전도모멘트 (내장형)

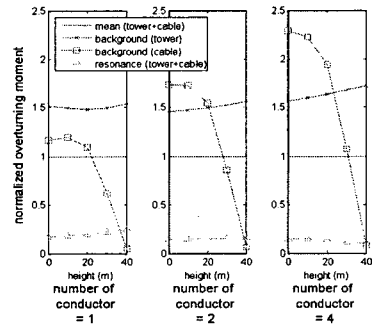


그림 5 정규화된 전도모멘트 (현수형)

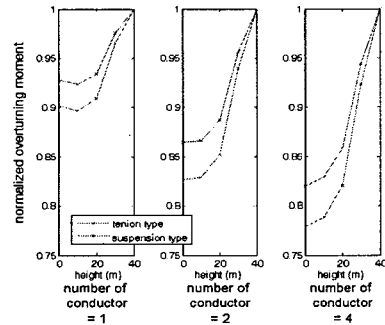


그림 6 전선에 의한 비공진성분 전도모멘트 50% 저감 시 전체 전도모멘트 저감률

그림 4는 내장형 송전철탄에 대한 해석결과이며 그림 5는 현수형 송전철탄에 대한 해석결과이다. 낮은 높이일수록 전선에 의한 비공진성분 전도모멘트의 비중이 커지고 전선의 다발 수가 증가할수록 전선의 수평면적이 증가하여 전선에 의한 비공진성분 전도모멘트의 비중이 증가하여 낮은

높이에서는 철탑본체보다 더 높은 비중을 갖게 됨을 알 수 있다. 반면에 공진성분의 경우에는 상대적으로 비중이 감소하는 경향을 볼 수 있으며 이는 전선의 질량 증가효과에 기인한 것으로 보인다. 또한 그림 4와 5를 비교하면 현수형 송전철탄이 내장형에 비해 전선에 의한 비공진성분 전도모멘트의 비중이 더 큼을 알 수 있다.

그림 6은 전선에 의한 전도모멘트를 50% 저감시킨 경우에 그로 인한 전체 전도모멘트의 저감률을 나타낸다. 전선의 다발 수가 증가할수록 전선의 비공진응답 성분이 증가하기 때문에 전선 응답 저감에 의한 전체 전도모멘트 저감 효과가 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 다발 수가 많은 전선이 설치된 송전철탄일수록 전선응답 저감의 필요성이 커진다고 할 수 있다.

4. 회전형 점탄성감쇠기의 풍하중 저감

4.1 전선 및 풍하중 모델링

앞서 살펴본 바와 같이 전선이 전체 송전철탄의 풍응답에서 차지하는 비중이 상당하므로 이를 저감하기 위한 방안을 마련할 필요가 있다. 이를 위해 우선적으로 전선에 대한 풍해석이 이루어져야 한다. 본 절에서는 전선의 풍진동 해석을 위한 전선 및 풍하중 모델링에 관해서 설명한다. 먼저 전선은 길이 300 m, 지름 22.9 mm인 단순보로 모델링하였으며 동일 길이의 20개 요소로 나누어 모델링하였다. 여기서 중요한 것은 전선은 일종의 전선 구조로서 장력에 의해 강성이 달라진다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 시간이력 해석에 앞서 전선의 자중과 평균풍하중에 대한 비선형 정적 해석을 순차적으로 수행하여 그로 인해 발생하는 기하강성의 효과를 반영하였다. 또한 공기역학적 감쇠를 모델링하기 위해 각 절점별로 그림 7에서와 같이 점탄성감쇠기가 존재하는 것으로 가정하였으며 감쇠계수는 평균풍하중에 대한 공기역학적 감쇠를 기준으로 하였다.

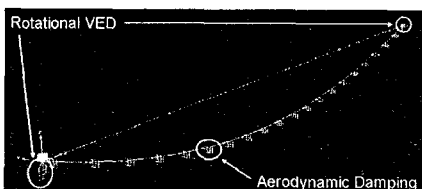


그림 7 전선의 수치해석 모델

전선의 시간이력해석을 수행하기 위해 각 절점의 위치에 따른 상관관계를 고려하여 절점 별로 풍하중의 시간이력을 생성하였으며 Shinozuka가 제안한 방법을 사용하였다.

4.2 회전형 점탄성감쇠기의 풍하중 저감효과

전선의 풍응답 가운데 철탑본체에 직접 영향을 미치는 것은 지지점의 반력이라고 할 수 있다. 이는 지지점의 반력이 철탄 본체에는 집중하중으로 작용하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 송전철탄의 풍하중의 저감방안으로서 전선의 양 단부에 회전형 점탄성감쇠기를 설치하는 방법을 제안한다. 설치 위치는 전선이 철탄 암에 연결되는 부분이며 감쇠기의 형상 및 설치 형태는 그림 8과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 회전형 점탄성감쇠기는 감쇠효과가 큰 점탄성 감쇠재료를 힌지 접합부에 삽입하여 전선 직각방향의 풍하중에 대해 전선에 연결된 접합부가 회전할 때 발생하는 비틀림에 대해 감쇠효과를 얻기 위한 형태를 갖는다.

감쇠기의 수치해석 모델은 용수철과 대쉬팟(dashpot)이 직렬 연결된 형태인 Maxwell 모델을 사용하였다. 감쇠기의 강성은 10 kgf/mm, 감쇠는 100 kgf sec/mm를 사용하였다. 풍하중의 크기에 따라서 전선의 기하강성 및 공기역학적 감쇠가 틀려지므로 기준 풍속을 20, 40 및 60 m/sec로 증가시키면서 시간이력 해석을 수행하였다.

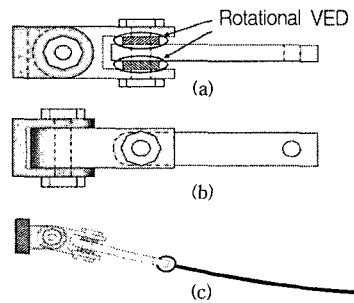


그림 8 회전형 점탄성감쇠기
(a) 측면도 (b) 평면도 (c) 설치형상

100초 동안의 풍응답을 대상으로 최대 지지점 반력의 저감률을 점탄성감쇠기의 감쇠상수 별로 계산하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 감쇠기의 성능은 감쇠상수가 증가할수록 점차 향상되나 특정 한계를 넘어서면서는 더 이상의 성능 향상이 없음을 알 수 있다. 또한 감쇠기의 성능은 풍속이 증가할수록 저하되고 있다. 이는 풍속이 증가할수록 평

균 풍하중이 증가하고 그로인해 유발되는 전선의 장력이 증가하여 감쇠기의 변형이 억제되기 때문인 것으로 추측된다. 그러나 앞서 그림 6의 기준이 되고 있는 응답 저감률인 50% 저감을 달성하고 있음을 볼 수 있으며 따라서 전선 다발수 및 평균풍속에 따라서 10-17% 정도의 전체적인 풍하중 저감효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

그림 10은 수평 풍하중의 총합에 대한 전선 우측 지지점 반력의 전달함수이다. 그림에서 볼 수 있듯이 응답의 저감이 특정 모드에 대해서 집중된 것이 아니라 전반적인 응답의 저감을 가져왔음을 알 수 있으며 오히려 1차 모드의 응답은 다른 진동수 성분에 비해 두드러진 것을 볼 수 있다. 즉 전선의 풍응답 가운데 공진성분이 아니라 비공진 성분의 저감이 큰 것으로 생각 할 수 있다. 실질적으로 전선에 의한 전도모멘트에서 공진성분이 작고 비공진성분이 지배적임을 고려할 때 제안된 회전형 감쇠기는 전선에 의한 풍하중을 효과적으로 저감시킨다고 할 수 있다.

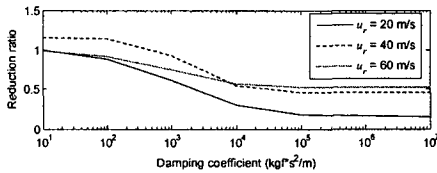


그림 9 감쇠상수 별 지지점 반력 저감률 변화 (VED 강성=10⁴kgf/m)

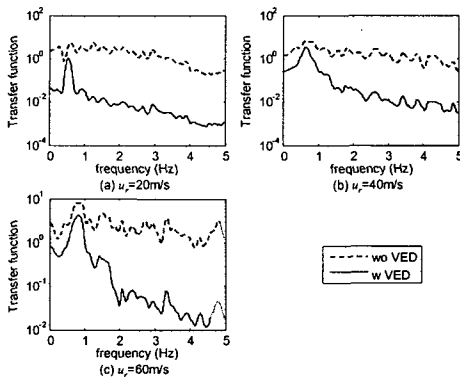


그림 10 우측 지지점 반력의 전달함수

5. 결론

본 연구에서는 추계학적 해석을 통해 송전철탄의 풍응답 특성을 파악하였다. 송전철탄의 풍응답을 구성하는 여러 요

소들 가운데 전선의 응답이 차지하는 부분이 상당히 크며 전선응답의 저감을 통해 상당 량의 풍응답을 저감할 수 있음을 확인하였다. 이 결과에 기초하여 회전형 점탄성감쇠기를 전선의 양 단부에 설치함으로써 전선으로 인해 철탄본체에 작용하는 풍하중을 저감시키는 방법이 제안되었으며 비공진 성분이 지배적인 전선의 풍응답을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 감쇠기를 사용한 송전철탄의 풍응답 저감에 관한 기초연구로서 추후 연구를 통해 제안된 회전형 점탄성감쇠기에 의한 응답저감의 메커니즘을 역학적으로 규명하고 그에 따른 감쇠기의 최적감쇠 및 강성을 제시할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04산학연C103A2000010-03A0200-00910)에 의한 것임.

참고문헌

- (1) Yasui, H., Marukawa H., Momoura Y., Ohkuma T. 1999. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 83, pp. 431-441.
- (2) Battista, R. C., Rodrigues, R. S. 2003. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, pp. 1051-1067.
- (3) Momomura Y., Marukawa H., Okamura T., Hongo E. 1997. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 72, pp. 241-252.
- (4) Holmes J. D. 1994. Along-wind response of lattice towers-I. derivation of expressions for gust response factors, *Engineering Structures*, vol. 16, No. 4, pp. 287-291
- (5) Ischueler G., Shinozuka M. 1987. *Stochastic Methods in Structural Dynamics*, Martinus Nijhoff Publishers
- (6) 건설핵심기술 연구개발사업 연차실적 및 계획서 2004. 철탄조 시설물의 붕괴를 방지하는 설치 용이한 경제적인 보강기구 개발, 과제번호: C103A2000010-03A0200-01010.