

송전선에 의해 송전철탑에 전달되는 풍하중 저감을 위한 회전형 점탄성감쇠기[#]

Rotational Viscoelastic Dampers for the Mitigation of Wind Loads on Transmission Tower Transferred from Transmission Lines

민 경 원* · 문 병 옥*

Kyung-Won Min and Byoung-Wook Moon

(2005년 12월 9일 접수 ; 2006년 3월 6일 심사완료)

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

ABSTRACT

In this study, wind loads transmitted to a transmission tower from transmission lines are mitigated using rotational viscoelastic dampers. First, the wind load characteristics in 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. From the result of the stochastic analysis, the background component of the overturning moment caused by the wind loads acting on the transmission lines are found to have considerable portion in the total overturning moment. Based on this observation result, a strategy installing rotational viscoelastic damper (VED) between tower arm and transmission line is proposed for the mitigation of the transmission line reactions, which play a role as dynamic loads on a transmission tower. For the purpose of verification, time history analysis is conducted for different wind velocities and VED parameters. The analysis result shows that the rotational VED is effective for the mitigation of the background component rather than the resonance component of the transmission line reactions and achieves the reduction ratio of 50 % even for higher wind speed.

1. 서 론

최근 들어 태풍 등의 강한 풍하중에 의해 송전철탑이 붕괴되는 사고가 발생하고 있다. 이는 설계하

중보다 큰 풍하중이 작용한 데서 기인한다고 볼 수 있겠으나 사전에 풍하중의 동적 특성과 구조물에 대한 영향이 보다 면밀히 파악되지 못한 데서도 그 원인을 찾을 수 있다. 특히 해안, 산악지대 등에 위치한 송전철탑은 지형에 의한 풍속 할중 내지는 불안정한 기류의 발생으로 인해 강풍에 의한 붕괴위험에 노출되어 있으나 기존 설계기준은 이를 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다.⁽¹⁾

송전철탑에 작용하는 풍하중은 크게 철탑 본체에 작용하는 하중과 전선에 작용하는 하중으로 분류할 수 있으며 각각의 풍하중은 공진성분과 비공진 성분

† 책임저자 ; 정희원, 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (02) 709-2731, Fax : (02) 795-7046

* 단국대학교 건축공학과

이 논문은 2005년 추계 소음진동학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

으로 세분된다. Holmes는 풍하중에 대한 추계학적 연구를 통해 격자형(lattice) 구조물의 풍응답은 상층부로 갈수록 공기성분의 영향이 큼을 보였다.⁽²⁾ Momomura 등은 실측을 통해 송전철탑의 풍응답 특성을 파악하였으며 전선이 연결됨으로써 송전철탑-전선 통합구조물의 감쇠가 증가함을 관찰하였다.⁽³⁾ 반면에 Yasui 등은 전선이 바람과 상호작용하여 발생하는 공기역학적 감쇠(aerodynamic damping) 및 전선에 작용하는 장력의 효과를 고려한 동적해석을 통해 송전철탑의 풍응답 특성을 파악하였다.⁽⁴⁾ 또한 Battista 등은 동적해석을 위한 전선의 모델링 방법과 송전철탑의 풍응답 특성에 관한 연구를 수행하였으며 진자형 동조질량형 감쇠기를 사용한 동적응답 저감 방법을 제안하였다.⁽⁵⁾

이 연구에서는 먼저 송전철탑의 풍응답에 대한 전선의 영향을 포함한 추계학적 해석을 통해 풍응답의 구성요소 별로 그 특성을 검토함으로써 전선에 의해 전달되는 풍응답이 전체 응답에서 차지하는 비중이 큼을 보인다. 그리고 이를 바탕으로 전선에 의해 송전철탑에 전달되는 풍하중을 저감시키기 위한 방안을 제시한다. 다만, 전선의 풍응답에는 풍방향 응답과 풍직각방향 응답이 있으나 이 연구에서는 송전철탑에 전달되는 수평 풍하중을 저감하는 것이 목적이므로 전선의 풍방향 응답만을 대상으로 한다. 또한 전선응답과 바람의 상호작용으로부터 공력진동이 발생할 수 있으나 이는 송전철탑의 붕괴를 야기하는 강풍이 아닌 낮은 풍속에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 현상은 주로 전선의 피로현상과 관련되어 있으며, 그 대책으로서 동조질량 감쇠기의 일종인 stockbridge 댐퍼가 이미 널리 사용되고 있다.⁽⁶⁻⁹⁾ 따라서 이 연구에서는 강풍 시 전선에 의해 전달되는 수평 풍하중의 영향을 저감하기 위한 방안을 제시하는 것으로 범위를 한정하며, 그 방법으로 송전철탑과 전선 사이에 점탄성감쇠기를 설치하는 방안을 제시하고 수치해석을 통해 그 효과를 검증한다.

점탄성 감쇠기는 지진 및 바람에 대한 건축 토목 구조물의 제진에 효과적인 장치로 알려져 있으며 관련 연구 및 실제 적용이 점차 증가하고 있다.⁽¹⁰⁾ Zhang과 Soong은 점탄성감쇠기의 기계적 특성에 기초하여 감쇠기가 설치된 다자유도 구조물의 제진성능 평가절차를 제시하였다.⁽¹¹⁾ Shen과 Soong은 점탄성감쇠기

의 온도 및 진동수 의존성을 고려한 해석적 모델을 제시하였다.⁽¹²⁾ Shen 등은 점탄성 감쇠기가 설치된 철근콘크리트 골조의 진동대 실험을 통해 감쇠성능 예측에 있어서 모드변형에너지법(modal strain energy method)의 정확도를 검증하였다.⁽¹³⁾ Chang 등은 점탄성 감쇠기가 설치된 철골조 구조물을 대상으로 유사한 실험을 수행하였다.⁽¹⁴⁾ Lai 등은 점탄성감쇠기가 설치된 철골조 구조물의 진동대 실험을 통해 설치용 가새와 온도의 영향을 조사하였다.⁽¹⁵⁾ 또한, Min 등은 점탄성 감쇠기가 설치된 실물규모의 5층 철골조 구조물을 대상으로 진동실험을 수행하였다.⁽¹⁶⁾ 뿐만 아니라 점탄성 감쇠기의 최적 설계를 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다.⁽¹⁷⁻²⁰⁾

그러나 이와 같은 연구는 주로 건축구조물을 대상으로 하고 있으며 송전철탑의 경우에는 주로 단면 증대를 통해 내풍보강이 이루어져 왔다. 이 연구에서는 건축구조물을 대상으로 성공적인 적용이 이루어져 온 점탄성 감쇠기의 적용대상을 송전철탑으로 확장하여 송전철탑에 작용하는 풍하중을 저감시키기 위해 전선 단부에 설치하기에 적합한 회전형 점탄성 감쇠기의 형태를 제시하고 그 성능을 수치해석을

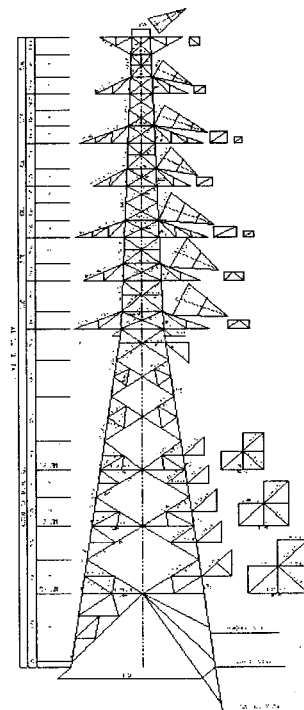


Fig. 1 Analyzed transmission tower

통해 검증하도록 한다.

2. 송전철탑의 풍응답 구성요소 분석

2.1 송전철탑과 송전선의 통합구조물 모델링

대상 송전철탑은 Fig. 1과 같으며, 송전철탑 본체와 가설선의 제원은 Table 1에 상세히 나타내었다. 이 가운데 전선은 복수 전선의 다발로 구성된 경우가 많기 때문에 하나의 전선 다발을 구성하는 전선 개수가 1, 2 및 4개인 경우로 나눠 해석을 수행하였다.

Table 1 Specification of the 154 kV transmission tower and line

Transmission tower	Height	55.7 m
	1st natural frequency	0.357 sec
Transmission line	Overhead earth line	Section : 152.8 mm ² Weight : 0.7089 kgf/m Length 300 m Height : 55.7 m
	Electric transmission line	Section : 480.8 mm ² Weight : 1.673 kgf/m Length : 300 m Height : 30.0, 34.3, 38.1, 42.6, 46.4, 50.7 m
	Insulator	0.9 m
	Line sag	2.7 m

송전철탑의 풍응답은 낮은 진동수 대역이 지배적인 풍하중의 특성상 최저차 모드가 지배하게 된다. 또한 전선의 풍응답 역시 풍하중의 진동수 특성상 저차의 모드가 지배적이 된다. 따라서 이 연구에서는 송전철탑을 단자유도 진동계로 모델링한다. 또한 전선은 애자의 영향을 고려하기 위해서 Fig. 2과 같이 직렬로 연결된 2중 진자로 가정하여 결과적으로는 2자유도의 진동계로 모델링하였으며 애자를 나타내는 상부 진자의 길이는 현수형 송전철탑의 경우에는 원래의 애자 길이인 90 cm를 사용하고 내장형 송전철탑의 경우에는 5 cm로 축소하여 근사적으로 모델링하였다. 하부 진자의 길이는 전선의 처짐량을 적용하였다. 개개의 전선-애자 시스템은 송전철탑에 병렬연결된 것으로 가정하여 Fig. 2와 같이 통합 구조물을 모델링하였다. Fig. 2의 애자와 케이블의 강성은 각각 다음과 같다.

$$k_i = \frac{m_c g}{l_i}; \quad k_c = \frac{0.5m_c g}{l_c} \quad (1)$$

여기서 k_i , k_c 는 각각 애자와 케이블의 강성, m_c 는 케이블 다발의 질량, g 는 중력가속도이다. l_i , l_c 는 각각 애자의 길이와 전선의 처짐량으로서 2중진자의 개별 길이에 해당된다. 감쇠는 통합구조물의 모든 모드에 0.02의 모드감쇠비를 적용하였다. 풍하중의 파워스펙트럼밀도는 Davenport가 제안한 식을 사용하였으며 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 송전철탑의 풍응답 구성요소

일반적으로 송전철탑의 거동은 캔틸레버 보에 가깝고 주주재의 축방향 부재력이 풍하중과 평형을 이루면서 저항하게 된다. 따라서 철탑 본체에 작용하는 전도모멘트가 철탑의 안전성과 관계된 중요한 응답이다. 전도모멘트의 계산은 비공진 성분의 경우

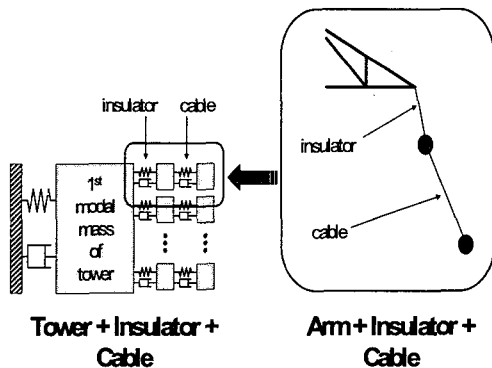


Fig. 2 Modeling of the transmission tower and line

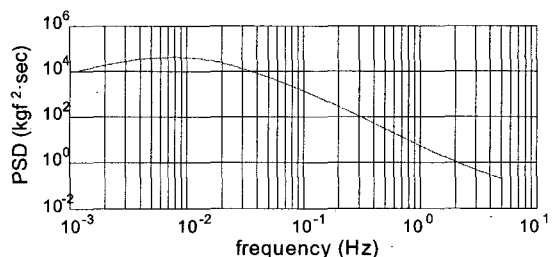


Fig. 3 Power spectral density of wind load

에 풍압과 수평면적에 비례하는 정적하중에 가까운 특성을 가지므로 절점별로 RMS 풍하중과 수평면적을 곱하여 계산하였다. 반면에 공진성분의 경우에는 철탄본체와 전선 사이에 상호작용이 있을 수 있으므로 앞서 Fig. 1에 나타난 통합구조물을 대상으로 해당 단면에서 각 절점까지의 모멘트 팔길이에 절점의 관성력을 곱하여 계산하였다.⁽¹⁾ 이 때 통합 구조물 모델에서 송전철탄 본체에 해당되는 질량체의 응답은 1차 모드의 일반화변위에 관한 것이므로 이를 실제 좌표계로 변환한 가속도 응답의 파워스펙트럼 밀도를 계산하였으며, 이를 적분하여 RMS 가속도를 계산한 뒤 관성력을 구하였다. 최종적으로 RMS 전도모멘트에 Davenport가 제안한 최대치 계수(peak factor)를⁽²¹⁾ 곱하여 최대 전도모멘트를 계산하였다. Fig. 4 및 5는 최대 전도모멘트를 평균풍하중에 의한 전도모멘트를 기준으로 정규화하여 나타난 것이다.

Fig. 4는 내장형 송전철탄에 대한 해석결과이며 Fig. 5는 현수형 송전철탄에 대한 해석결과이다. 낮은 높이일수록 전선에 의한 비공진 성분 전도모멘트의 모멘트 팔길이가 길어져서 전체 전도모멘트에서 차지하는 비중이 커진다. 또한, 전선의 다발 수가 증가할수록 전선의 수평면적이 증가하여 전선에 의한 비공진성분 전도모멘트의 비중이 증가하게 되고 따라서 낮은 높이에서는 철탄본체에 작용하는 풍하중에 의한 비공진성분 전도모멘트보다 더 큰 비중을 갖게 됨을 알 수 있다. 반면에 공진성분의 경우에는 상대적으로 비중이 감소하는 경향을 볼 수 있으며

이는 전선의 질량 증가효과에 기인한 것으로 보인다. 또한 Fig. 4와 5를 비교하면 현수형 송전철탄이 내장형에 비해 전선에 의한 비공진 성분 전도모멘트의 비중이 더 큼을 알 수 있다.

전선에 작용하는 풍하중에 의한 철탄 본체의 비공진성분 전도모멘트는 전선의 반력에 의해서 발생한다고 할 수 있으며 Fig. 6은 이 전선 반력을 50% 저감시킨 경우에 그로 인한 전체 전도모멘트의 저감률을 나타낸다. 전선의 다발 수가 증가할수록 전선의 비공진성분 응답이 증가하기 때문에 전선 응답 저감에 의한 전체 전도모멘트 저감효과가 증가하

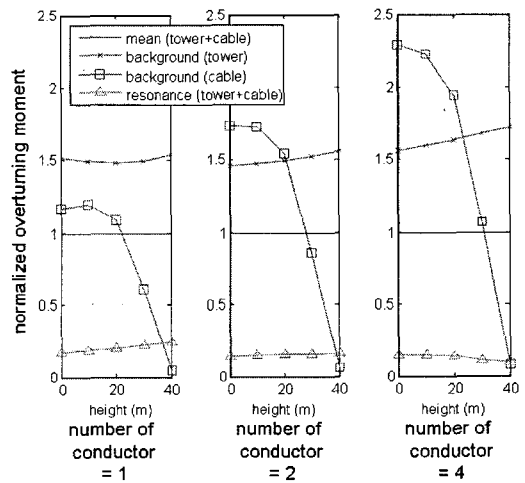


Fig. 5 Normalized peak overturning moment (suspension type)

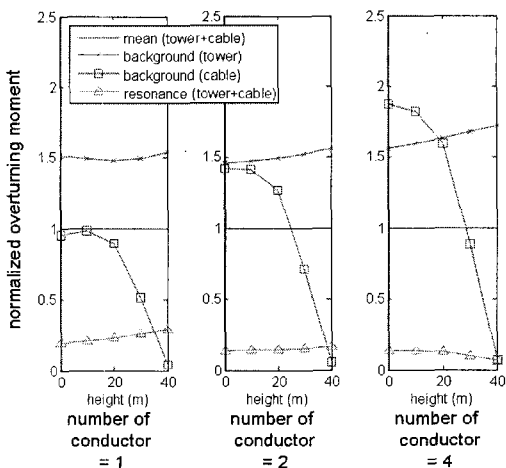


Fig. 4 Normalized peak overturning moment (tension type)

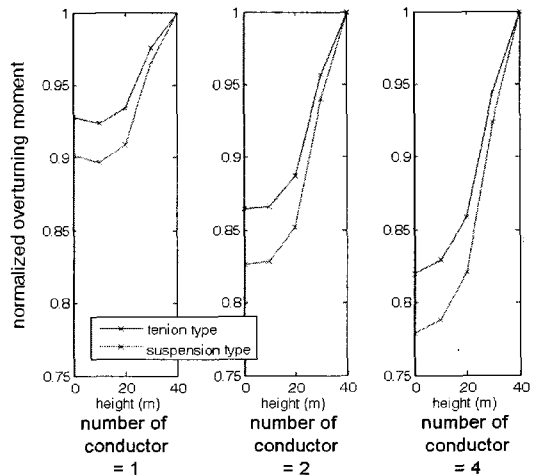


Fig. 6 Overall overturning moment reduction ratio for 50% reduction of that from transmission line's background response

는 것을 볼 수 있으며 다발 수가 4인 경우에 송전 철탑 기초에서 약 20%의 전도모멘트 저감효과를 거둘 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 다발 수가 많은 전선이 설치된 송전철탑일수록 전선응답 저감의 필요성이 커진다.

3. 점탄성감쇠기를 이용한 송전철탑 풍하중 저감

3.1 송전선 모델링

앞서 살펴본 바와 같이 전선이 전체 송전철탑의 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 이 연구에서는 시간이력 해석에 앞서 전선의 자중과 평균 풍하중에 대한 비선형 정적 해석을 순차적으로 수행하여 그로 인해 발생하는 기하강성의 효과를 반영하였다.

또한 송전선에서는 전선과 바람 사이의 상대속도에 의해서 공기역학적 감쇠가 존재하므로⁽²²⁾ 이를 모델링하기 위해 각 절점별로 Fig. 7에서와 같이 점탄성감쇠기가 존재하는 것으로 가정하였으며 각각의 감쇠계수는 평균풍속에 대한 공기역학적 감쇠를 기준으로 하였다. 전선의 시간이력해석을 수행하기 위해 Fig. 3과 같은 스펙트럼으로부터 각 절점의 위치에 따른 상관도를 고려하여 절점 별로 풍하중의 시간이력을 생성하였으며, Shinozuka가 제안한 변환 방법을 사용하였다.⁽²³⁾

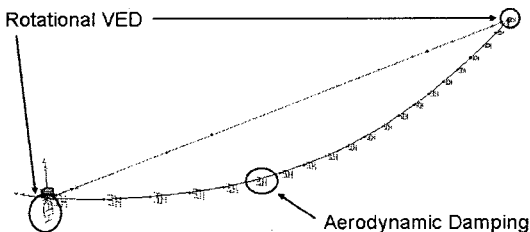


Fig. 7 Numerical model of the transmission line

3.2 회전형 점탄성 감쇠기

전선의 풍응답 가운데 철탑본체에 직접 영향을 미치는 것은 지지점의 반력이라고 할 수 있다. 이는 지지점의 반력이 철탑 본체에는 집중하중으로 작용하기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 송전철탑의 풍하중의 저감방안으로서 전선의 양 단부에 점탄성 감쇠기를 설치하는 방법을 제안한다. 여기서, 송전철탑의 형태는 전선과 송전철탑의 연결이 회전형 점탄성 감쇠기 설치에 적합한 내장형인 것으로 그 적용 범위를 한정한다. 이 경우 수평 풍하중에 의해 전선 단부에서 발생하는 전선과 지지점 사이의 상대변위는 전선의 수평운동에 의한 회전 변위이므로 점탄성 감쇠기는 이 회전운동에 의해 점탄성 재료의 비틀림 변형이 발생하는 구조를 갖는 회전형을 채택하였다. 이와 같은 점탄성 감쇠기는 덴마크의 DAMPTECH社에서 회전형 마찰감쇠기와 함께 복합형 감쇠기로 구성되어 이미 상용화된 바 있다.⁽²⁴⁾ 이 연구에서는 마찰 패드 없이 순수하게 점탄성 물질만을 사용하여 구성된 회전형 점탄성 감쇠기를 송전철탑과 전선 사이에 설치하기 적합한 형태로 제시하였으며 전선의 수직운동에 의한 회전에 대해서는 힌지 형식의 지지 조건을 갖는다. 감쇠기의 형상 및 설치 형태는 Fig. 8과 같다. 여기서 볼 수 있듯이 제안된 회전형 점탄성감쇠기는 감쇠효과가 큰 점탄성 감쇠재료를 힌지 접합부에 삽입하여 전선 직각방향의 풍하중에 대해 전선에 연결된 접합부가 회전할 때 발생하는 비틀림 변형으로부터 감쇠효과를 얻게 된다.

3.3 풍하중 저감효과 분석

감쇠기의 수치해석 모델은 용수철과 대쉬팟(dashpot)이 직렬 연결된 형태인 Maxwell 모델을 사용하였다. 풍하중의 크기에 따라서 전선의 기하강성 및 공기역학적 감쇠가 틀리므로 지상 10m 높이에서의 기준 풍속을 20, 40 및 60 m/sec로 증가시키면서 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 비선형 해석용 소프트웨어는 SAP2000을 사용하였고, fast nonlinear analysis 알고리즘을 적용하였다.⁽²⁵⁾

감쇠기의 감쇠상수가 105 kgf·sec/m이고 강성이 104 kgf/m인 경우에 대해서 얻어진 우측 지지점 반력의 시간이력은 Fig. 9와 같으며 이로부터 정리한 RMS응답과 최대응답은 Fig. 10과 같다. 감쇠기의

반력 저감 성능은 풍속이 증가할수록 저하되고 있음을 볼 수 있다. 이는 풍속이 증가할수록 평균 풍하중이 증가하고 그로인해 유발되는 전선의 장력이 증가하여 감쇠기의 변형이 억제되기 때문이다. 그러나 앞서 Fig. 6의 기준이 되고 있는 응답 저감률인 50% 저감을 달성하고 있음을 볼 수 있으며 따라서 전선 다발수 및 평균풍속에 따라서 8~22% 전후의 전도 모멘트 저감효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

점탄성감쇠기의 감쇠상수 별로 100초 동안의 풍 응답 시간이력에 대한 최대 지지점 반력의 저감률을 계산하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다. 감쇠기의 성능은 감쇠상수가 증가할수록 점차 향상되나 특정 한계를 넘어서면서는 더 이상의 성능 향상이 없음을

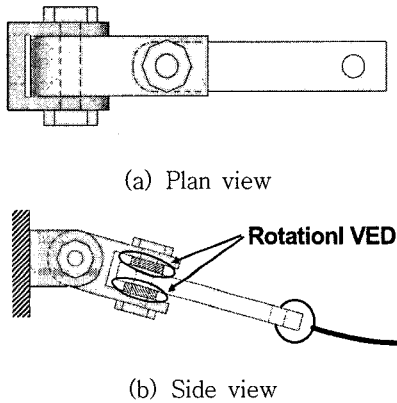


Fig. 8 Rotational VED

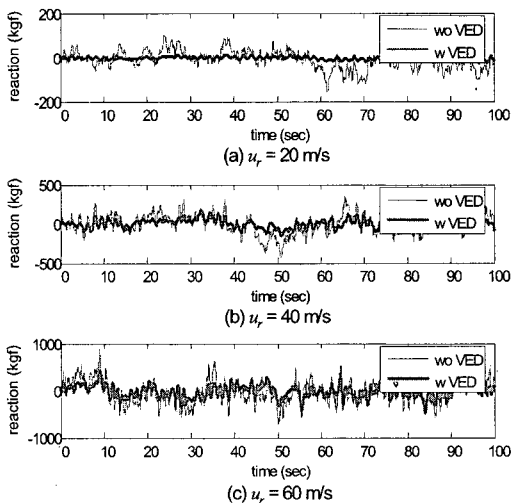


Fig. 9 Time history of the right support reaction of the transmission line

알 수 있다. 따라서 이 연구에 사용된 송전선 모델에 있어서 감쇠기의 효율성을 고려한 최적의 감쇠상수는 약 105 kgf·sec/m임을 알 수 있다.

Fig. 12는 전선 우측 지지점 반력의 파워스펙트럼 밀도이다. 점탄성 감쇠기를 설치하기 전에는 반

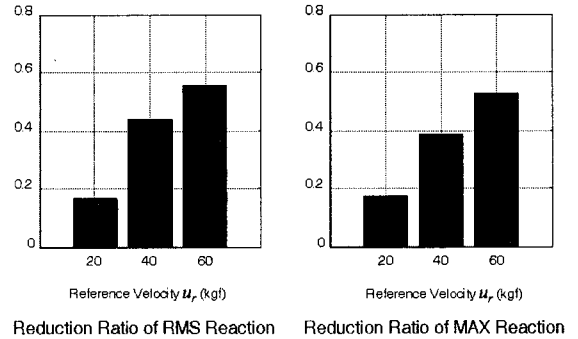


Fig. 10 Reduction ratio of the right support reaction of the transmission line

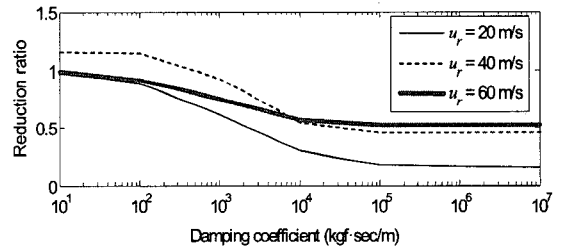


Fig. 11 Variation of the reduction ratio of the right support reaction with respect to the damping coefficient of the rotational VED (VED stiffness = 104 kgf/m)

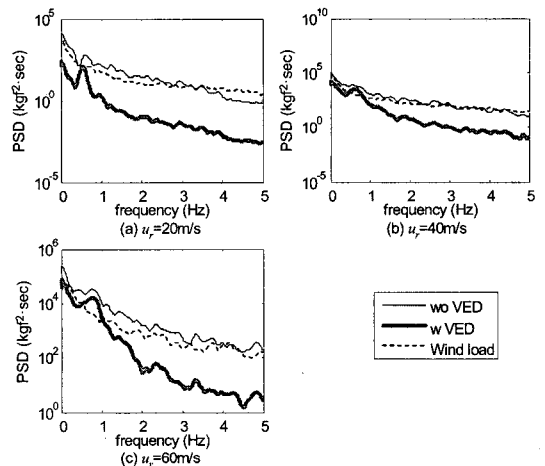


Fig. 12 Power spectral density of the right support reaction

력과 풍하중 총합의 50%에 해당하는 파워스펙트럼밀도가 거의 유사하며 점탄성 감쇠기 설치 후에는 상당한 크기의 응답이 저감된 것을 확인할 수 있다. 또한 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 고려한다면 제안된 회전형 감쇠기는 전선에 의한 풍하중을 효과적으로 저감시킨다고 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 추계학적 해석을 통해 송전철탐의 풍응답 특성을 파악하고 이를 저감하기 위해 송전철탐과 송전선의 연결부에 회전형 점탄성 감쇠기를 설치하는 방법을 제안하였다. 이를 통해 송전철탐 풍응답의 여러 구성요소들 가운데 전선의 응답이 차지하는 비중이 상당히 크며, 전선응답의 제어를 통해 상당량의 풍응답을 저감할 수 있음을 예상할 수 있다. 이에 따라 점탄성감쇠기를 전선의 양 단부에 설치함으로써 공진성분보다는 비공진 성분이 지배적인 전선의 풍응답을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였으며, 풍속과 전선의 다발수에 따라 10에서 17%의 응답저감률을 얻을 수 있을 것으로 예측된다. 점탄성 감쇠기의 감쇠상수가 증가할수록 풍응답 저감효과가 향상되었으나 효율성 면에서 한계치가 존재하며, 따라서 추후 연구를 통해 회전형 점탄성 감쇠기의 응답저감 메커니즘을 역학적으로 규명하고 그에 따른 감쇠기의 최적과라미터를 제시할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설핵심기술연구개발사업 과제번호 (C103A2000010-05A0200-00510 및 C105A1050001-05A0505-00210)에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) 건설핵심기술 연구개발사업 연차실적 및 계획서 2004. 철골조·시설물의 붕괴를 방지하는 설치 용이한 경제적인 보강기구 개발, 과제번호: C103A2000010-03A0200-01010.
- (2) Holmes J. D., 1994, Along-wind Response of Lattice Towers- I, Engineering Structures, vol. 16, No. 4, pp. 287~291.
- (3) Momomura Y., Marukawa H., Okamura T. and 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) Yasui, H., Marukawa H., Momoura Y. and 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.
- (5) Battista, R. C., Rodrigues and 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.
- (6) Tesar, A., Kuglerova, J., 2000, Tuned Vibration Control of Overhead Line Conductors, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 48, pp. 1215~1239.
- (7) Markiewitz, M., 1995, Optimum Dynamic Characteristics of Stockbridge Dampers for Dead-end Spans, Journal of Sound and Vibration, Vol. 188, No. 2, pp. 243~256.
- (8) Diana, G., Cigada, A., Belloli, M., Vanali, M., 2003, Stockbridge-type Damper Effectiveness Evaluation: Part I - Comparison Between Tests on Span and on the Shaker, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1462~1469.
- (9) Diana, G., Manenti, A., Pirotta, C., Zuin A., 2003, Stockbridge-type Damper Effectiveness Evaluation: Part II - The Influence of the

Impedance Matrix Terms on the Energy Dissipated, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1470~1477.

(10) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons.

(11) Zhang, R.-H., Soong, T. T., 1989, Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 18, pp. 389~396.

(12) Shen, K. L., Soong, T. T., 1995, Modeling of Viscoelastic Dampers for Structural Applications. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121, No. 6, pp. 694~701.

(13) Shen, K. L., Soong, T. T., Chang, K. C. Lai, M. L., 1995, Seismic Behaviour of Reinforced Concrete frame a with Added Viscoelastic Dampers. Engineering Structures, Vol. 17, No. 5, pp. 372~380.

(14) Chang, K. K., Soong, T. T., Oh, S.-T. and Lai, M. L., 1995, Seismic Behavior of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 10, pp. 1418~1426.

(15) Lai, M. L., Chang, K. C., Soong, T. T., Hao, D. S., Yeh, Y. C., 1995, Full-scale Viscoelastically Damped Steel Frame, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 10, pp. 1443~1447.

(16) Min, K.-W., Kim, J., Lee, S.-H., 2004, Vibration Test of 5-storey Steel Frame with Viscoelastic Dapers. Engineering Structures, Vol. 26, pp. 831~839.

(17) Zhang R. H., Soong T. T., 1992, Seismic

Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications. Journal of Structural Engineering, Vol. 118, pp. 1375~1392

(18) Shukla A. K., Datta T. K., 1999, Optimal use of Viscoelastic Dampers in Building Frames for Seismic Response. Journal of Structural Engineering, Vol. 125, pp. 401~409.

(19) Lee, S.-H., Son, D.-I., Kim, J.-K., Min, K.-W., 2004, Optimal Design of Viscoelastic Dampers Using Eigenvalue Assignment. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 33, No. 4, pp. 521~542.

(20) Park, J.-H., Kim, J.-K., Min, K.-W., 2004, Optimal Design of Added Viscoelasticdampers and Supporting Braces. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 33, No. 4, pp. 465~484.

(21) Davenport, A. G., 1964, Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust loading. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, Vol. 28, pp. 187~196.

(22) Matheson, M. J. and Holmes, J. D., 1981, Simulation of the Dynamic Response of Transmission Lines in Strong Winds, Engineering Structure, Vol. 3, pp. 105~110.

(23) Ischueler G. and Shinozuka M., 1987, Stochastic Methods in Structural Dynamics, Martinus Nijhoff Publishers.

(24) <http://www.damptech.com/products/products.htm>

(25) Computers and Structures, 2002, SAP2000 Analysis Reference Manual.