축소 모델을 이용한 수동 루프 송전선 자기장 저감율 분석

Analysis of ELF Magnetic Field Reduction Ratio on Passive Loop Using Scale Down Model of Transmission Line

조연규 · 명성호 · 이재복 · 장석훈

Yeun-Gyu Cho · Sung-Ho Myung · Jae-Bok Lee · Sug-Hun Chang

요 약

본 연구는 수동 루프 축소 시험 장치를 이용하여 수동 루프 유형별 자기장 저감 효과를 분석하였다. 본 연구에서는 수직 2회선 선로 및 수평 선로를 대상으로 실험을 통하여 향후 실증 시험 선로에 적용할 수동 루프의 자기장 저감 효과를 검토하였다. 그 결과 수동 루프 채용으로 선로 리액턴스 보상이 없어도 50 % 이상의 송전 선로의 자기장 저감 효과를 얻을 수 있음을 확인함으로써 실증 선로 수동 루프 적용 방안을 확보하였다. 대부분 우리나라 송전 선로에 채용되는 수직 2회선 선로에서는 수평 루프보다는 수직 루프가 자기장 저감율에 보다 효과적이었으며 차폐 영역에서도 근거리뿐만 아니라 원거리까지도 효과가 좋음을 알 수 있었다. 또한, 수동 루프를 3 턴으로 설치하는 경우가 1 턴에 비해 2배 정도 자기장 저감 효과가 있음을 확인하였다.

Abstract

In this research magnetic field reduction effect of each passive loop was analyzed by using the scale down models of transmission lines. This paper examined magnetic field reduction effect of the passive loop that will be applied to actual facility through the experiment, which is about double vertical transmission line and horizontal transmission line. Consequently, by confirming the fact that magnetic field reduction effect can be obtained to 50 % by passive loop without reactive compensation, we insured technology about application of passive loop. And the case of 3 turns of loop showed two times reduction effect than that of 1 turns of loop in reducing magnetic field. Vertical passive loop is more efficient than horizontal passive loop in the aspect of reducing magnetic field on double vertical transmission lines. What is more, vertical passive loop showed good effect of reducing magnetic field in a far distance as well as in a short distance.

Key words : ELF, Magnetic Field, Vertical Passive Loop, Horizontal Passive Loop, Field Reduction Factor

Ⅰ. 서 론

산업의 발달은 설비의 증설로 이어지고 필수적인 전력 수요의 증가는 송전 선로 건설과 더불어 송전 선로에서 발생하는 전자기장에 대한 유해성 문제로 이어지고 있는 실정이다. 이러한 문제로부터 송배전 선로의 자기장 세기를 낮추기 위한 저감 방법으로 여러 가지 기술이 검토되고 있으나 그 중에서 송전선 근처에 상쇄 루프를 설치하여 자기장을 저감하는 것이 기존 선로에 적용하기 좋은 방법 중에 하나이다.

그러나 실 선로에 구축되는 수동 루프 관련 설비는 한번 설치하면 수정이 힘들 뿐 아니라 한번 설치에 많은 시간과 예산이 소요되는 어려움이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 미리 수동 루프 축소 시험장치를 구성하여 실험을 통해 결과치를 분석함으로서 불필요한 시간과 예산

한국전기연구원 전기환경송전연구그룹(Electrical Environment & Transmission Group, Korea Electrotechnology Reseach Institute)
· 논 문 번 호 : 20061101-137
· 수정완료일자 : 2006년 12월 5일

을 절감하여 실규모 연구를 원활하게 수행할 수 있도록 함으로서 향후 전자기장 저감 실증 시험을 효율적으로 추진할 수 있도록 하였다.

Ⅱ. 수동 루프에 의한 자기장 저감 원리

수동 루프에 의한 자기장 저감은 송전선 근처에 상쇄 루프를 설치하여 자기장을 저감하는 것으로 기존 선로에 가장 적용하기 좋은 방법 중에 하나이다. 상전류 자기장에 의해 루프에 전류가 유도될 때, 상쇄 루프는 수동 루프라 하며 루프 전류가 독립 전원에 의해 운전될 때 상쇄 루프는 능동 루프라 불리어진다. 송전선은 전력선의 위상이 일정하고 크기만 변하므로 루프 전류도 크기만 변하고 위상은 일정하게 유지된다. 이 경우에 차폐계수는 시간에 따라 변하지 않고 측정점의 위치에만 의존하게 된다. 수동 루프를 사용한 자기장 저감 원리를 다음 그림 1의 송전 선로 모델에서 설명한다. 이는 6개의 상도체 아래에 상도체에 의한 자기장 자속을 상쇄시키기 위한 2개의 보조 도체를 폐루프 형태로 적용한 구조의 단면도이다.

기본 원리는 상도체의 자속에 의하여 폐루프에 전압이 유기되면 유도 전류가 흐르게 되는데 이 유도 전류에 의한 자속이 원래 상도체의 자속을 상쇄시켜 지표면 근처의 자기장을 저감시키게 된다. 먼저, 송전 선로 전류 I_j에 의한 자속이 수동 루프에 쇄교하는 자속은 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\Phi = \oint_s \vec{B_s} \cdot d\vec{s} \tag{1}$$

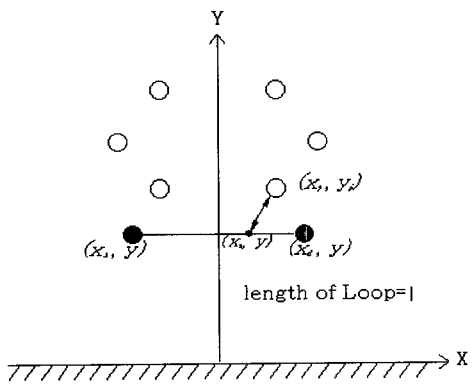


그림 1. 수동 루프를 채용한 송전 선로 단면도
Fig. 1. Cross section of transmission line adopting passive loop.

실제 송전 선로는 다상 시스템이므로 각 상의 크기와 위상을 고려하면 전체 자속 Φ_{total}는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{total} = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i e^{j\theta_i} \tag{2}$$

이때 Faraday's law으로부터, 루프 도체의 유도전압은 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$V_{loop} = -\frac{d}{dt}\Phi_{total} \tag{3}$$

이때, 수동 루프의 유도 전류 I_{loop}는 유도 전압 V_{loop}와 루프 임피던스 Z_{loop}에 의해 다음 식 (4)와 같이 결정되게 된다.

$$I_{loop} = \frac{V_{loop}}{Z_{loop}} \tag{4}$$

루프 임피던스 Z_{loop}는 저항 R_{loop}와 자기인덕턴스 L_{loop}로 표현되며 그 관계식은 다음과 같다.

$$Z_{loop} = \sqrt{R_{loop}^2 + \omega^2 L_{loop}^2},$$
$$\theta_{Z_{loop}} = \tan^{-1}(\omega L_{loop}/R_{loop}) \tag{5}$$

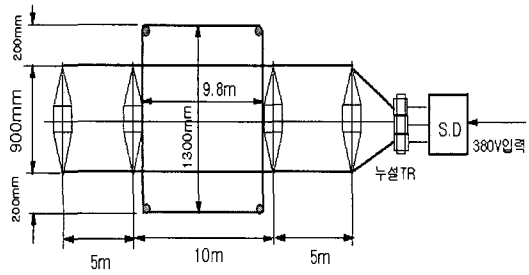
여기서 θ_{Zloop}는 위상각을 나타낸다.

따라서 원래 상전류에 의한 자속이 보조 수동 루프 전류(I_{loop})에 의한 자속과 백터적으로 상호 결합되어 전체적으로 선로 아래에서 자기장 저감 효과가 발생하게 된다.

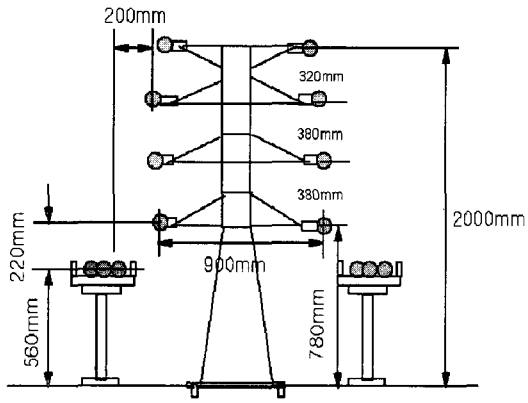
Ⅲ. 축소형 수동 루프 실험 장치 구성

3-1 축소형 시험 설비 구성

수동 루프 축소 시험을 위한 모의 송전 선로는 높이 2 m의 간이 철탑 4기를 이용하여 루프 시험 경간 10 m와 양쪽 지지경간 5 m, 총 20 m의 길이로 구성하였다. 수동 루프선은 1 턴과 3 턴으로 비교 시험할 수 있도록 하고, 수동 루프 선정시 도체의 직경과 저항이 유도 전류의 결정 요소가 되므로 가급적 굵은 도체로 선정하였다. 이에 따라 본 실험에서는 이를 만족시킬 수 있는 1 km당 도체 저항이 0.183 Ω인 100 sq 케이블을 선정하여 사용하였다. 그림 2의 (a)와 (b)는 수동 루프 축소 시험 장치의 개략적인 평면도와 단면도이다.



(a) 평면도
(a) Plane figure



(b) 단면도
(b) Cross sectional figure

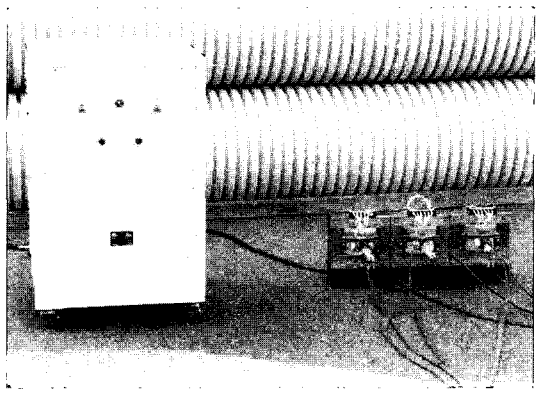
그림 2. 수동 루프 축소 시험 장치
Fig. 2. Scale down equipment of passive loop system.

3-2 전원 장치

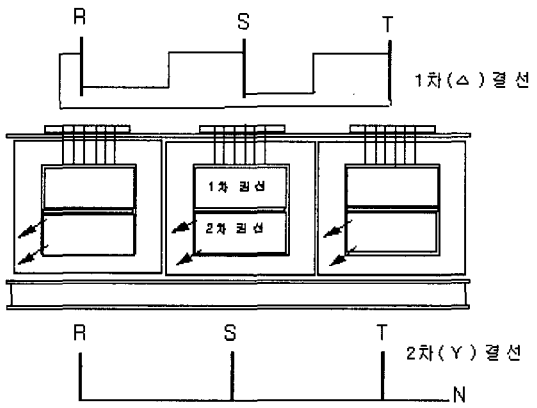
축소형 모의 송전 선로에 전류의 공급을 위하여 기존 380 V 전원을 0~400 V까지 전압을 변동시킬 수 있는 슬라이덕스와 1차 전압에 의해 전류를 가변 발생시킬 수 있는 누설 변압기를 제작하여 사용하였다. 그림 3은 전류원 공급 장치를 나타낸 것이다.

3-3 수동 루프 지지대

수동 루프를 설치하기 위한 지지대 구성은 100 sq 3 턴의 케이블 무게와 장력을 견딜 수 있는 지지대를 구성함에 있어 간이 지지물로는 설치가 불가능하였다. 즉, 수동 루프로 사용되는 100 sq 3 턴의 케이블의 장력과 무게를 간이 지지물은 견디기 어려우므로 목재를 이용하여 높이와 폭을 맞춘 루프 형상의 가대를 제작하여 장력을 받지 않도록 100 sq 케이블



(a) 전류원 외형
(a) Figure of current source



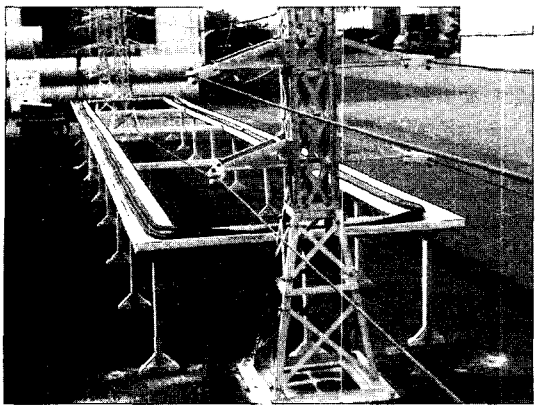
(b) 누설 변압기의 결선도
(b) Wiring of leakage transformer

그림 3. 전류원 공급 장치
Fig. 3. Current source feed system.

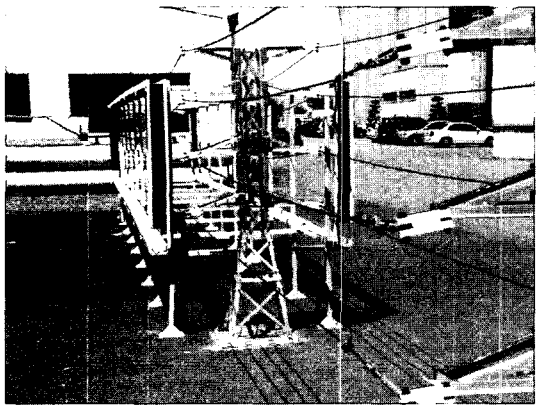
3 턴을 루프 형상의 가대에 올려놓는 방법으로 그림 4의 (a)는 수평 루프를 설치한 것이며, 그림 4의 (b)는 수직 루프를 설치한 모양이다.

3-4 자기장 측정기

본 연구를 위해 사용된 계측기는 미국 EPRI가 개발한 EMDEX II를 이용하였으며, 외형은 그림 5에 재원은 표 1에 나타내었다. 자기장은 벡터량이므로 3축으로 측정해야 하는데 자기장은 내장된 3개의 센서를 이용하여 x, y, z축 성분을 모두 측정한 다음 $\sqrt{x^2+y^2+z^2}$가 내부에서 계산되어 합성치가 표시된다. 본 시험에서 자기장은 선로 중앙의 지표면을 기준으로 하여 측정한 값을 나타내었다.



(a) 수평 수동 루프 설치
(a) Installation of horizontal passive loop



(b) 수직 수동 루프 설치
(b) Installation of vertical passive loop

그림 4. 수동 루프 설치
Fig. 4. Installation of passive loop.

Ⅳ. 수동 루프 유형별 자기장 저감 분석

수동 루프는 감는 턴 수에 따라 자기장의 저감율이 달라지며 통상 턴 수가 증가하면 저감율은 올라가게 된다. 그러나 무작정 루프의 회선을 증가하기보다는 실제 적용시에는 케이블의 무게에 따른 장력과 선로 비용 등 경제성을 감안하여 적당한 턴 수를 결정하게 된다. 본 연구에서는 이런 점을 감안하여 저감 효과를 비교할 수 있는 1 턴과 3 턴으로 선정하였으며, 선로의 인가 전류는 그림 1의 (b) 구성 선로에 흘릴 수 있는 적정 전류인 50 A 정도로 하였다(표 2 참조). 그리고 수동 루프와 모의 송전 선로의 이격 거리는 전선의 측면과 하부로부터 각각 200 mm의 이격 거리로 설치하였다.

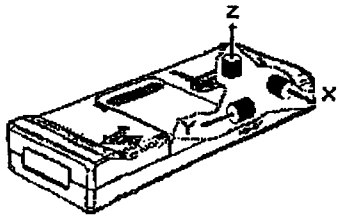


그림 5. EMDEX Ⅱ 외형
Fig. 5. Figure of EMDEX Ⅱ.

표 1. EMDEX Ⅱ 특성
Table 1. Specification of EMDEX Ⅱ.

Specification	EMDEX II
	Magnetic Field
Dimension	16.8×6.6×3.8 cm
Weight	341 g
Frequency Range	40~800 Hz
Measurement Method	True RMS
Temperature Range	0~60 °C
Field Range	0.1~3000 mG
Resolution	0.1 mG
Accuracy	±1 %
Max. Sampling Rate	1.5 s

4-1 수직 2회선 선로 수평 수동 루프

시험 장치의 구성은 그림 6과 같으며, 그림 7에는 수직 2회선 선로 수평 수동 루프 1 턴과 3 턴을 비교 분석한 결과를 나타내었다. 표 3은 수동 루프의 임피던스 및 루프에 인가된 유도 전압, 전류치와 선로 중앙에서 측정한 자기장 저감율을 표시한 것이다. 실험 분석 결과 3 턴의 경우가 1 턴에 비해 최대 50 %

표 2. 축소형 송전 선로 상전류
Table 2. Phase current of scale down transmission line.

상 구분	#1 회선 전류	#2 회선 전류
A상	51.2A	47.0A
B상	48.6A	50.4A
C상	48.0A	51.0A

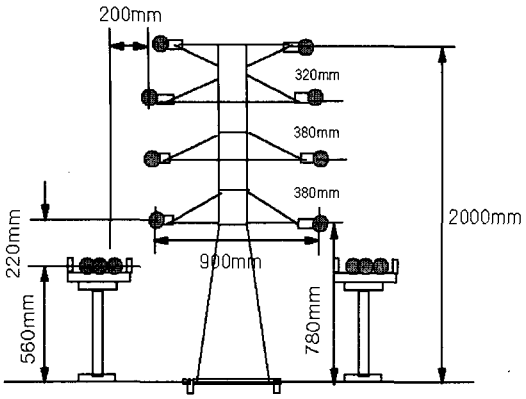


그림 6. 축소형 수직 2회선 선로 수평 수동 루프
Fig. 6. Horizontal passive loop of scale down double vertical transmission line.

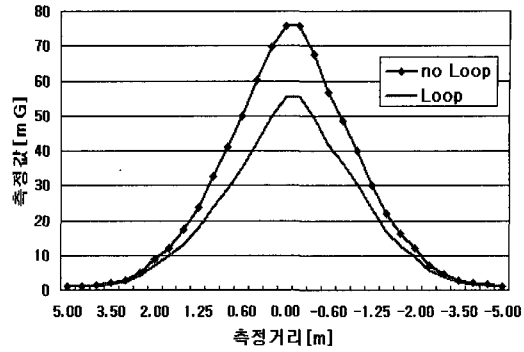
표 3. 수동 루프 턴 수에 따른 자기장 저감
Table 3. Magnetic field according to turn number of passive loop.

구분	LOOP 선로		전류 인가시		측정치(mG)		저감율
	$R(\Omega)$	L (mH)	루프 전압 (V)	루프 전류 (A)	OPEN	CLOSE	
1 TURN	0.0083	0.0257	0.058	4.6	71.6	54.4	24 %
3 TURN	0.0249	0.1593	0.175	7.7	74	42.8	42 %

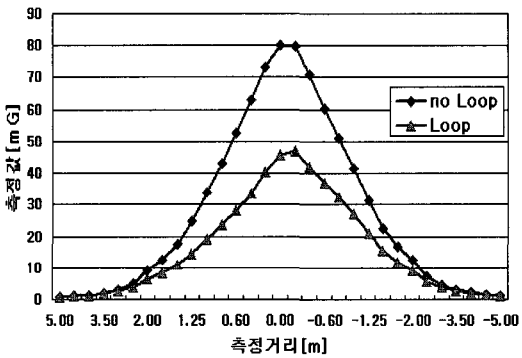
이상의 자기장 저감율 향상을 보이는 것으로 확인할 수 있었다. 특히 수직 선로에서 수평 루프는 선로 직하의 근거리 자기장 저감에는 효과적이지만, 선로로부터 일정거리 이상 떨어지면 그 효과가 반감하여 원거리에서는 오히려 자기장이 수동 루프 설치시 보다 높아지는 경향이 있음을 알 수 있었다.

4-2 수직 2회선 선로 Double 수직 수동 루프

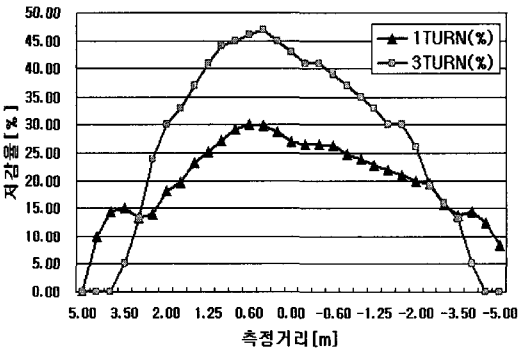
Double 수직 수동 루프의 경우는 수평 루프와는 달리, 선로 직하의 근거리 자기장 및 원거리 자기장 저감에도 수평 수동 루프보다 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 2회선 루프를 설치해야 하므로 수평 루프에 비해 설치비가 상승하게 되는 요인이 된다. 시험 구성도는 그림 8과 같으며 그림 9에 1 턴과 3 턴 시



(a) 루프 유무에 따른 자기장 비교(1 턴)
(a) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(1 turn)



(b) 루프 유무에 따른 자기장 비교(3 턴)
(b) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(3 turn)



(c) 자기장 저감율 비교
(c) Comparison of magnetic field reduction ratio

그림 7. 수직 2회선 선로 수평 수동 루프 자기장 저감율
Fig. 7. Magnetic field reduction ratio of horizontal passive loop of double vertical transmission line.

상세 분석 결과를 나타내었다. 그 결과 3 턴의 경우가 1 턴에 비해 50 % 이상 자기장 저감율 효과가 있

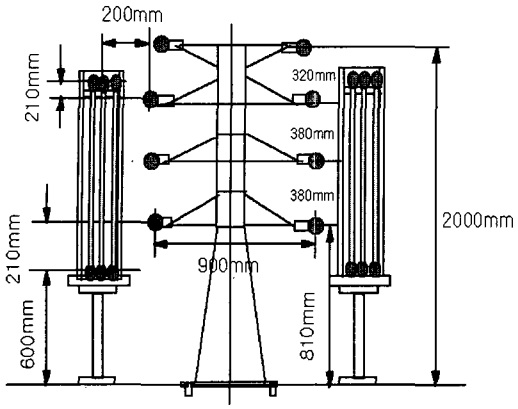


그림 8. 수직 2회선 선로 double 수직 수동 루프
Fig. 8. Vertical passive loop of scale down double vertical transmission line.

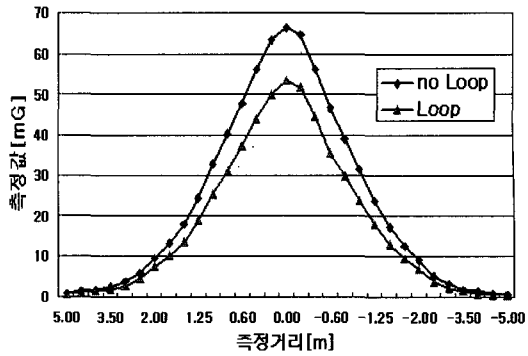
표 4. 턴 수에 따른 수동 루프 전기적 파라미터
Table 4. Electrical parameter of passive loop according to turn number.

구분		LOOP 선로		전류 인가시	
		$R(\Omega)$	L(mH)	루프전압 (V)	루프전류 (A)
R	1 턴	0.00779	0.02468	0.058	4.6
L		0.00837	0.0248	0.062	5.3
R	3 턴	0.02527	0.1510	0.163	7.4
L		0.02609	0.1525	0.182	7.6

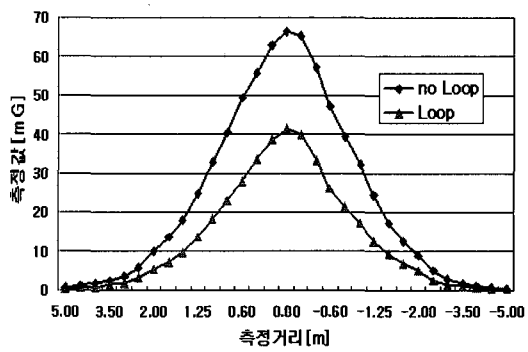
음을 확인할 수 있었다.

4-3 수직 2회선 선로 One-side 수직 수동 루프

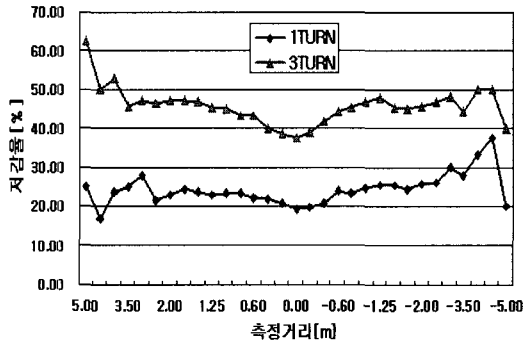
수직 2회선 선로의 한편에만 수직 수동 루프를 설치하여 자기장 저감 효과를 시험하였다. 이 경우는 한쪽편만 자기장 저감이 필요한 경우가 사용될 수 있는 방식으로 실험 구성도는 그림 10과 같다. 여기에서도 3 턴의 경우가 1 턴에 비해 좋은 자기장을 보였으나 루프를 사용하지 않는 쪽에서는 오히려 자기장이 증가하는 패턴을 보인다. 이것은 루프 설치 쪽에서는 상전류에 의한 자속과 수동 루프 전류에 의한 자속이 벡터적으로 상쇄되지만 루프를 설치하지 않은 반대편 선로 쪽에서는 상전류에 의한 자속과 수동 루프 전류에 의한 자속이 벡터적으로 증가하기 때



(a) 루프 유무에 따른 자기장 비교(1 턴)
(a) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(1 turn)



(b) 루프 유무에 따른 자기장 비교(3 턴)
(b) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(3 turn)



(c) 자기장 비교
(c) Comparison of magnetic field reduction ratio

그림 9. 수직 2회선 선로 수직 수동 루프 자기장
Fig. 9. Magnetic field reduction ratio of vertical passive loop of double vertical transmission line.

문이며 실제 설치시 주의를 요하는 부분이다.

4-4 수평 1회선 선로 수동 루프

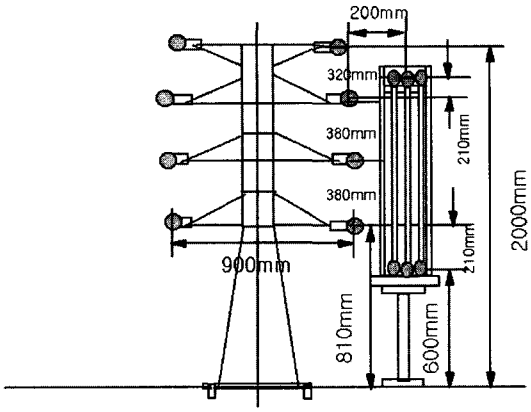


그림 10. 수직 2회선 선로 one-side 수직 수동 루프
Fig. 10. One-side vertical passive loop of scale down double vertical transmission line.

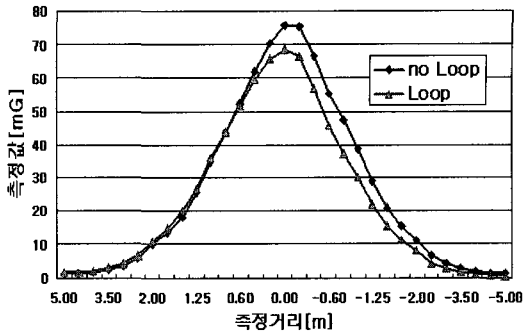
표 5. 턴 수에 따른 수동 루프 전기적 파라미터
Table 5. Electrical parameter of passive loop according to turn number.

구분		LOOP 선로		전류 인가시	
		$R(\Omega)$	L(mH)	루프전압 (V)	루프전류 (A)
R	1 턴	0.00818	0.0247	0.065	5.9
L		-	-	-	-
R	3 턴	0.02593	0.15181	0.191	8.7A
L		-	-	-	-

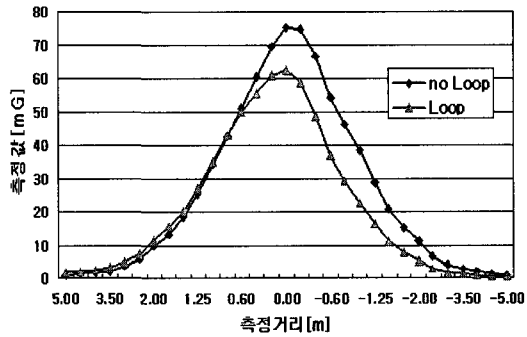
수평 선로 배열은 주로 배전 선로에서 사용되고 있다. 본 논문에서는 그림 12와 같이 장치를 구성하여 수평 수동 루프 1 턴과 3 턴에 대한 저감 효과 실험을 하였다. 3 턴의 경우가 그림 13과 같이 근거리뿐만 아니라 원거리까지도 좋은 자기장을 보이는 것을 알 수 있었다. 표 6은 수동 루프의 임피던스 및 루프에 인가된 유도 전압, 전류치와 선로 중앙에서 측정한 자기장를 표시한 것이다.

V. 실험 결과 및 결론

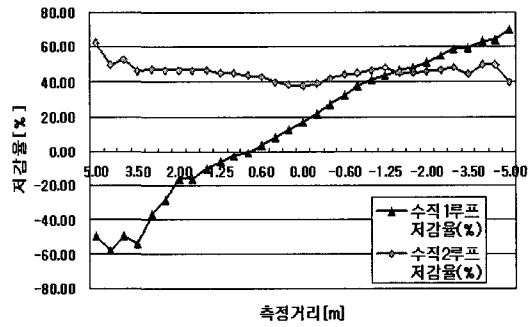
본 연구는 축소형 수동 루프 실험을 통해 실제 선로에서의 수동 루프 적용 방안을 확보하는 것을 목적으로 하였다. 수동 루프 전류는 송전 선로의 전류에 따라 변하므로 위상이 일정하고 크기만 변하는 송전



(a) 루프 유무에 따른 자기장 비교(1 턴)
(a) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(1 turn)



(b) 루프 유무에 따른 자기장 비교(3 턴)
(b) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(3 turn)



(c) 자기장 비교
(c) Comparison of magnetic field reduction ratio

그림 11. 수직 2회선 선로 one-side 수직 수동 루프 자기장
Fig. 11. Magnetic field reduction ratio of one-side passive loop of double vertical transmission line.

선로의 경우에 루프 전류도 크기만 변하고 위상은 일정하게 되므로 자기장 저감율은 시간에 따라 변하

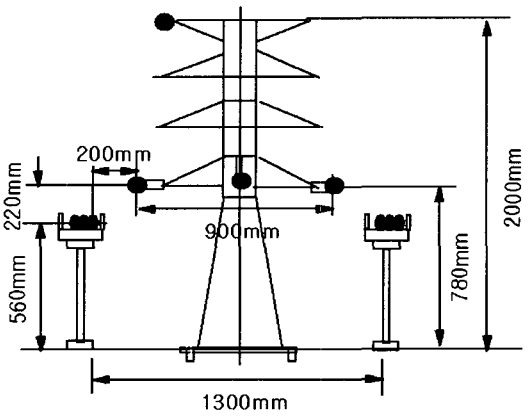
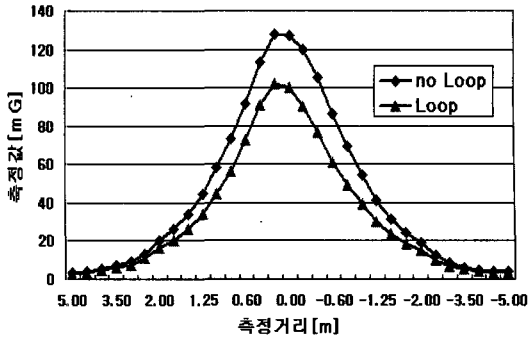


그림 12. 수평 1회선 선로 수동 루프 구성도
Fig. 12. Horizontal passive loop of scale down flat transmission line.

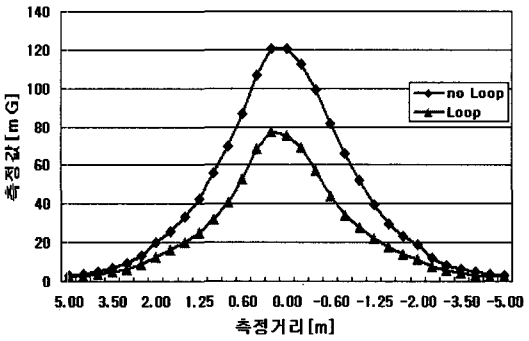
표 6. 수동 루프 턴 수에 따른 자기장
Table 6. Magnetic field according to turn number of passive loop.

구분	LOOP 선로		전류 인가시		측정치(mG)		저감율
	$R(\Omega)$	L (mH)	루프 전압 (V)	루프 전류 (A)	OPEN	CLOSE	
1 TURN	0.0078	0.0245	0.094	8.3	127	100.2	21 %
3 TURN	0.0249	0.1587	0.265	12.4	120.6	75.4	37 %

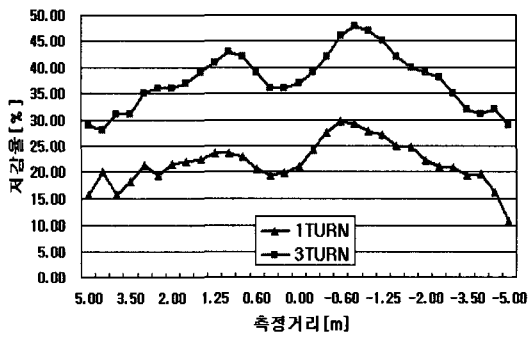
지 않고 측정점의 위치에만 의존하게 된다. 분석 결과 수직 2회선 선로에서는 수평형 수동 루프보다는 수직형 수동 루프가 보다 효과적이었으며, 수직 2회선 선로 one-side형 수직 수동 루프의 경우 루프를 설치한 쪽은 자기장의 감소 효과가 양호했으나, 루프를 사용하지 않는 쪽에서는 오히려 자기장이 증가하는 패턴을 보임을 알 수 있었다. 또한, 수평 루프는 선로 직하의 근거리 자기장 저감에는 효과적이지만, 선로로부터 일정거리 이상 떨어지면 그 효과가 반감하여 원거리에서는 오히려 자기장이 수동 루프 설치시보다 증가하였다. 그러나 향후 우리나라의 경우 송전 선로 직하에도 건물이 위치하는 경우는 비용 측면에서 고려할 필요도 있어 보인다. 수동 루프의 모든 케이스에서 3 턴의 경우가 1 턴에 비해 효과가



(a) 루프 유무에 따른 자기장 비교(1 턴)
(a) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(1 turn)



(b) 루프 유무에 따른 자기장 비교(3 턴)
(b) Comparison of magnetic field according to existence of passive loop(3 turn)



(c) 자기장 저감율 비교
(c) Comparison of magnetic field reduction ratio

그림 13. 수평 1회선 선로 수평 수동 루프 자기장 저감율
Fig. 13. Magnetic field reduction ratio of horizontal passive loop of flat transmission line.

좋은 것으로 분석되었으며, 최대 2배 이상의 자기장 저감 향상 효과가 있는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, 2nd Ed., chap. 8, 1982.

[2] CRIEPI, *Electrical Design Handbook of 187~1,100 kV Transmission Lines*, 1987.

[3] EPRI, *Magnetic Field Management for Overhead Transmission Lines: Potential Options for Low Field Designs*, TR-104413, Sep. 1995.

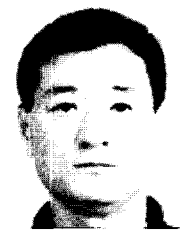
[4] A. R. Memari, W. Janischewskyj, "Mitigation of magnetic field near power lines", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1577-1586, 1996.

[5] Per Pettersson, "Principles in transmission line magnetic field reduction", *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 1, no. 3, Jul. 1996.

[6] Sung Ho Myung, "Analysis of magnetic field distribution around electric power facilities", *CRIEPI/KEPRI/KERI Joint Workshop on Electric & Magnetic Field Effects*, May 1999.

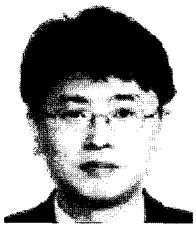
[7] 명성호 외, "극저주파 전자기장 안전성 평가 및 저감 실증기술개발", 산업자원부 보고서, 2006년 7월.

조 연 규



2002년 2월: 경남대학교 전기공학과 (공학사)
2005년 8월: 국립창원대학교 전기공학과 (공학석사)
1989년 2월~현재: 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 선임기술원
[주 관심분야] EMI/EMC 대책설계, 전기환경 대책설계

이 재 복



1985년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
1987년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학박사)
1987년 2월~현재: 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 책임연구원 전자기과도현상 대책기술 팀장
[주 관심분야] 전력계통 서지해석/대책, 접지계 해석

명 성 호

1981년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1983년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1985년 8월~현재: 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹장
[주 관심분야] EMI/EMC, ELF EMF, 전기환경 등

장 석 훈

1996년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
1999년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
2003년 2월~현재: 한국전기연구원 기환경송전연구그룹 선임연구원
[주 관심분야] 전력계통 서지해석/대책, 접지계 해석