

4도체 가공선로에서 복도체 스페이서를 이용한 진동저감 대책 연구

논문
58P-3-14

A Study on Measures Against Subspan Oscillation using Twin Spacers in 4 Bundle Overhead Lines

이형권[†] · 한형주*
(Hyung-Kwon Lee · Hyeong-Ju Han)

Abstract - The oscillation is very dangerous in bundled transmission lines, besides 4 bundle transmission lines are very weak for subspan oscillations. In some cases, subspan oscillations are continuously occurred in the same subspan. In order to develop the control method of the above subspan oscillation, this paper suggests a method of applying twin spacers to the subspans. We have carried out some tests to analyze the oscillation phenomena after installing twin spacers on 4 bundle overhead lines, and we got a good effect for controlling subspan oscillations by installing twin spacers

Key Words : Subspan Oscillations, Twin Spacers, 345kV Transmission Lines, Spacer Damper

1. 서론

4도체 가공송전선로에는 바람에 의한 진동현상으로부터 전선을 보호하기 위해 스페이서댐퍼(Spacer Damper)가 설치되어 있다. 그러나 2도체, 3도체 등 다른 가공선로에 비해 4도체 가공선로는 진동현상에 취약한 구조로서, 특히 스페이서댐퍼와 스페이서댐퍼 사이에서 서브스판진동(subspan oscillation)이 잘 발생할 수 있는 조건이다. 서브스판진동 외에 미풍진동, 갠럽핑 진동 등이 발생할 수 있으나 4도체 가공선로에서 미풍진동은 크게 문제되지 않으며, 갠럽핑 진동은 국내에서 잘 발생하지 않는다. 따라서 4도체 가공선로에서 진동이라 하면 주로 서브스판진동이다. 현재까지 진동방지를 위해 문제가 되는 구간에서는 전체 경간의 스페이서댐퍼 위치를 재조정하거나 추가하는 형태로 대책을 강구해 왔다. 그러나 이러한 대책에도 불구하고 진동현상은 매우 복잡한 조건에서 발생함에 따라, 특정 소경간(subspan)에서만 진동현상이 빈번하게 발생하여 전선과 스페이서댐퍼가 손상을 받는 사례가 자주 나타났다.

따라서 본 논문에서는 4도체 송전선로에서 국부적으로 서브스판진동이 계속 발생하는 소경간의 진동을 저감시키기 위한 대책으로서, 복도체 스페이서를 소경간 사이에 설치하는 것을 제시한다. 이의 일환으로서 먼저 서브스판진동 발생 다발 소경간에 대해 제안하는 진동저감 방법의 타당성을 참고문헌[1]에서 검토하여 제안한 바가 있고, 본 논문에서는 실선로 실증실험을 통해 제안한 내용의 타당성을 직접 검증하였다.

2. 본론

2.1 4도체 가공선로 진동현상

4도체 가공선로는 소도체 구조상 후류에 의한 진동현상이 주로 발생을 하는데, 이 진동은 바람을 직접 받는 풍상측(windward) 도체의 후면이 공기역학적 차폐로 인해 풍속이 감소된 영역이 발생되고, 이 영역에 위치한 풍하측(leeward) 도체의 양력 발생으로 인해 진동하는 현상이다. 후류에 의한 진동은 그림 1과 같이 4개의 진동유형으로 구분되는데 (a)를 서브스판진동(subspan oscillation)이라 하고 나머지 3개 진동을 강체형진동(rigid-body mode)이라고 한다.

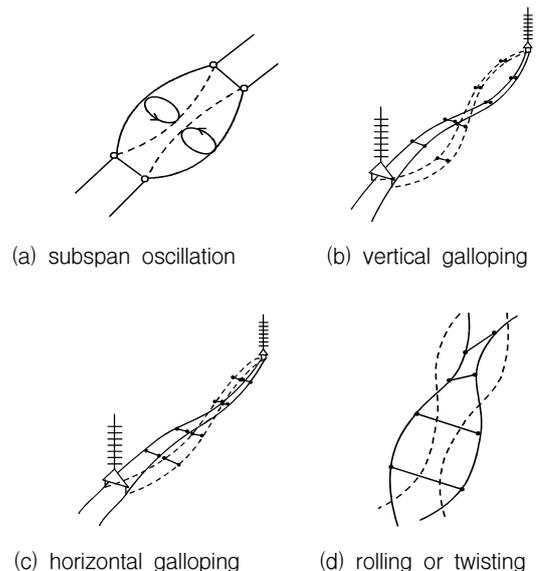


그림 1 후류에 의한 진동유형
Fig. 1 Oscillation mode by a wake

[†] 교신저자, 정회원 : 한국전기연구원 책임연구원 · 공박
E-mail : hklee@keri.re.kr

* 정 회원 : 한국전기연구원 위촉연구원
접수일자 : 2009년 6월 15일
최종완료 : 2009년 7월 25일

이 중 서브스판진동은 그림 1-(a)와 같이 스페이서와 스페이서 사이의 공간에서 1~2개의 루프를 형성하면서 풍상측 도체와 풍하측 도체의 위상이 서로 180° 차이를 갖고 타원궤적을 그리며 진동하는 특징이 있으며, 서브스판의 진폭이 클 경우에는 스페이서뎀퍼 클램프 또는 현수클램프의 전선 지지점에 곡응력(bending moment)에 의한 전선의 피로 현상이 누적되어 전선의 수명을 단축시키거나 단선사고를 일으키게 된다.

2.2 복도체 스페이서를 이용한 서브스판진동 저감 개념

일반적으로 철탑과 철탑사이의 한 공간을 놓고 볼 때, 서브스판진동이 발생하면, 여러 개의 소경간에서 동시에 발생하는 경우도 있으나, 선로구성 또는 경과지 조건에 따라서는 유독 일부 몇 개의 소경간에서만 서브스판진동이 빈번하게 발생하는 경우가 있다. 본 연구에서는 이런 소경간을 서브스판진동 발생 다발 소경간이라 칭한다.

4도체 가공선로의 진동발생 다발 소경간에서 발생하는 진동은 대체적으로 진동이 크고 자주 발생하기 때문에 전선에 미치는 영향도 크다. 이런 소경간에서는 스페이서뎀퍼 위치에서 전선이 쉽게 단선되거나 스페이서뎀퍼가 손상되는 사고가 발생하기 때문에, 가급적 빠른 시일 내에 진동저감대책을 세우는 것이 필요하다. 서브스판진동을 저감시키기 위해 일반적으로 적용되고 있는 대책은 다음과 같다.

- 소도체수와 배열을 조정 방법
- 소도체 간격을 조정하는 방법
- 다도체 구성의 비틀림 정도를 조정하는 방법
- 스페이서뎀퍼 설치간격을 조정하는 방법

상기 방법은 개선작업 규모가 크고 비용도 많이 들며, 스페이서뎀퍼를 추가하여 서브스판 간격을 조정하더라도 서브스판 간격을 무한정 줄일 수 없는 문제점이 발생하게 된다. 또한 개선작업 후 서브스판 진동이 발생하지 않는다는 보장도 없다.

본 논문에서 제안하는 사항은 아래 그림 2와 같은 복도체 스페이서를 서브스판진동이 다발하는 소경간 내에 적절하게 설치함으로써 서브스판간격을 좁히는 효과를 통해 서브스판진동을 저감시키는 방법이다.

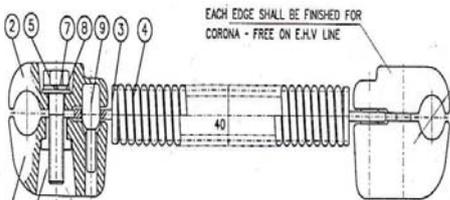


그림 2 송전용 복도체 스페이서
Fig. 2 Twin spacers for transmission lines

2.3 실증실험 방법

2.3.1 복도체 스페이서 설치방법

4도체 구성에서 2개의 전선을 지지하기 위한 복도체 설치 방법은 그림 3과 같이 상부 2도체간, 하부 2도체간, 좌우 상하부간 2도체를 상호 연결시켜 설치하는 4가지 방법이 있

다. 앞에서 서술한 바와 같이 서브스판진동은 풍상측 도체의 후류에 의해 발생하는 것이므로, 서브스판진동 발생원리 측면에서 보면 수평방향으로 놓인 상부 2도체 또는 하부 2도체 사이의 상호관계에서 먼저 서브스판진동이 발생한다고 볼 수 있다. 또한 같은 개념에서 보면 상하부간 도체는 서브스판진동 발생에 상호 영향을 주지 않는다.

이상과 같은 개념에 따라 복도체 스페이서는 수평방향으로 놓인 두 도체간에 설치하는 것이 적절하다.

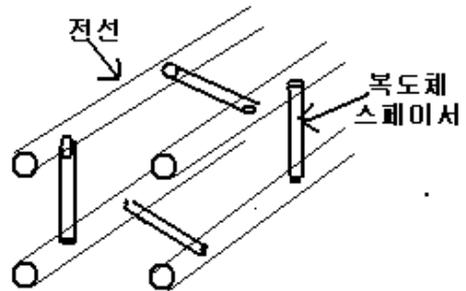


그림 3 복도체 스페이서 설치방법
Fig. 3 Installation method of the twin spacers

2.3.2 실증실험선로 및 위치선정

본 실험에 대한 이론적 해석은 비대칭적인 요소가 많아 어렵고, 모의시험선로를 활용하는 것도 어려움이 있다. 따라서 4도체 가공선로 중에서 서브스판진동이 가장 빈번히 발생하는 한국전력의 선로를 선정하여 실증실험을 하였다.

일반적으로 서브스판진동이 많이 발생하는 선로는 송전선로와 직각방향으로 일정하게 바람이 부는 지역, 일정한 바람이 계속적으로 부는 지역, 산의 능선과 평활한 지역 등을 경과하는 경우가 대부분이다. 이러한 지역을 경과하는 구간에서 스페이서뎀퍼 관련 유지보수 실적이 많은 것으로 조사되었는데, 조사결과에 따르면 4도체 가공선로 중에서 서브스판진동이 가장 많이 발생한 가공선로는 345kV 영포선로 등 몇몇 선로가 있다. 본 연구에서는 실험의 편리성, 진동발생의 빈도, 진동현상 측정 편리성 등을 고려하여 그림 5의 345kV 영포선로에서 형산강을 횡단하는 구간을 실험대상선로로 선정하였다.

2.3.3 소경간 내 복도체 스페이서 설치수량 및 설치지점

서브스판진동 저감을 위해 소경간 내에 몇 개의 복도체 스페이서를 어느 위치에 설치할 것인지를 정할 필요가 있다. 345kV 4도체 송전선로에서 스페이서뎀퍼의 평균 설치간격은 약 45m 정도이고, 가장 긴 소경간 길이는 63m이다. 따라서 평균 소경간 길이와 최대 소경간 길이를 기준으로 보면 복도체 스페이서를 상하부 2도체에 각각 1개씩 설치할 경우 소경간 간격은 23m~34m로 좁혀지는 효과가 나타난다. 이런 간격이면 서브스판진동 발생 시작 풍속이 매우 높아지는 효과가 있기 때문에 진동저감에 유효하다. 이러한 개념에서 다음과 같은 실험조건을 정하였다.

- 소경간 내 상부, 하부에 각 1개씩만 설치함
- 좌·우 편측 $\frac{2}{5}$ 지점에 설치 [그림 4의 (2)(4)번]
- 상부와 하부 비대칭으로 설치 [그림 4의 (3)번]

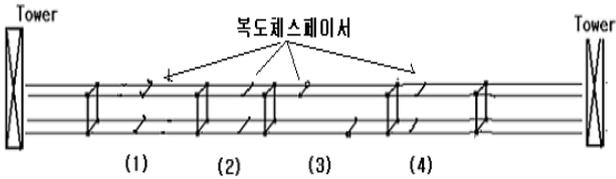


그림 4 복도체 스페이서 설치방법 개념도
Fig. 4 Installation method of the twin spacers

2.3.4 서브스판 진동 측정 및 분석 방법

실증실험은 실제 송전선로에서 하기 때문에 서브스판진동 측정이 쉽지 않다. 실선로가 아닌 시험선로인 경우에는 센서나 측정장비를 직접 설치하여 측정 가능하나, 실선로인 경우 센서 설치가 불가능하고, 측정을 위한 현장 접근성이 떨어지는 등의 문제점이 있기 때문에 실증실험 자체가 쉽지 않다. 서브스판진동을 측정 후 분석하기 위해서는 다음과 같은 실험데이터가 필요하다.

- 위치별 전선 진동현상 기록 데이터
- 시험선로 주변의 풍향 및 풍속데이터

서브스판진동은 바람이 분다고 해서 발생하는 것이 아니며, 다양한 발생조건(풍향, 풍속, 온도 등)이 일치할 때 발생한다. 이러한 특성 때문에 진동현상 측정을 위해서는 상시 진동측정 센서나 감시카메라 등을 설치하여 데이터를 확보하는 것이 좋다. 그러나 실험 대상이 실제 선로이기 때문에 이와 같은 방법은 어려움이 있어, 적절한 방법으로 현장의 기상상황을 원격으로 파악한 후, 서브스판진동이 발생할 것으로 예상되면, 직접 현장방문을 통해 진동현상을 촬영하여 분석하는 것이다.

2.4 실증실험 및 분석

2.4.1 서브스판 진동 측정 및 분석 방법

2.3항의 실험조건을 토대로 345kV 영포선로에서 서브스판진동이 가장 잘 발생하는 소경간에 복도체 스페이서를 설치하여 서브스판진동 현상을 기록 분석하였다. 복도체 스페이서 설치상태를 보면 그림 5와 같다.



그림 5 복도체 스페이서 설치상태
Fig. 5 The twin spacers on 4 bundle lines

실험을 위해 복도체 스페이서를 설치한 조건은 표 1, 표 2와 같다. 각 표에서 복도체 스페이서 설치간격은 서브스판 내에서 복도체 스페이서를 설치했을 때, 설치점을 기준으로 좌우 간격을 의미한다.

표 1 철탑 #310호~311호 간 복도체 스페이서 설치조건

Table 1 Installation positions in the span #310~311

위치	스페이서면퍼 설치수량 및 간격											
#1A	9경간	35-45-50-60-45-55-44-50-44-35										
#1B	8경간	39	47	55	63	55	63	55	47	39		
	복도체 스페이서 설치 간격	상부2도체								23/32	16/23	
	하부2도체								23/32	23/16		
#1C	9경간	35	45	50	60	45	55	44	50	44	35	
#1C	복도체 스페이서 설치 간격	상부2도체							20/30	18/26		
	하부2도체							30/20	26/18			

표 2 철탑 #312호~313호 간 복도체 스페이서 설치조건

Table 2 Installation positions in the span #312~313

위치	스페이서면퍼 설치수량 및 간격													
	12경간	37	45	43	50	47	51	44	48	45	50	43	46	38
#1A	설치 간격	상부				(20/30)		(21/30)	(18/26)					
		하부				(30/20)		(30/21)	(26/18)					
#1B	설치 간격	상부			21/29	17/30	24/27	18/26						
		하부			21/29	17/30	24/27	18/26						
#1C	설치 간격	상부			21/29	17/30	24/27	18/26						
		하부			29/21	30/17	27/24	28/18						

* () 는 08년4월2일 추가설치 구간

2.4.2 진동현상 기록 및 분석

표 1, 표 2의 각 실험조건에서 많은 비교 데이터가 수집되었는데, 그 중 표1의 #1B 9번째 서브스판과 표2의 #1A 4번째 서브스판에서 취득된 진동현상 예를 들어 분석해 보면 다음과 같다.

① [표1]의 #1B 9번째 서브스판진동 현상

㉠ 복도체 스페이서 미설치시 서브스판 진동현상

먼저 표 1의 #1B상 9번째 소경간에서 발생한 서브스판진동 현상으로서, 복도체 스페이서가 설치되어 있지 않은 조건에서 발생한 진동현상의 예를 보면 아래와 같다.

표 3 #1B 9번째 서브스판 진동 발생

Table 3 Oscillations on the 9th subspan in #1B

번호	진동 기록 시간	진동분석 시간대[sec]	진동 발생내용
1	2007.6.29일 16:20:00~16:27:55	16:03:00~16:03:05	B상 서브스판 진동발생
2	2008.5.6일 15:05:00~15:10:00	15:05:47~15:05:52	
3	2008.5.7일 15:25:00~15:28:00	15:25:06~15:25:11	

번호	풍속 [m/s]	풍향 [deg]	진동주파수 (상선/하선) [Hz]	진동최대진폭 (p-p) [cm]			
				상선		하선	
				풍상	풍하	풍상	풍하
1	8	225	1.54/1.52	17.72	19.20	0	26.98
2	9.8	225	1.52/1.52	0	16.05	7.72	15.68
3	5.0	225	1.52/1.50	7.28	14.79	0	5.08

표 3의 3번 항목과 같이 다소 낮은 풍속에서도 큰 진동이 발생함에 따라 진동현상은 복합적 요인(풍속, 풍향, 경간길이, 지형특성 등)에 의해 나타나는 것으로 보인다. 표 3의 1번 항목에 대한 진동발생장면은 그림 6에서 보인다.

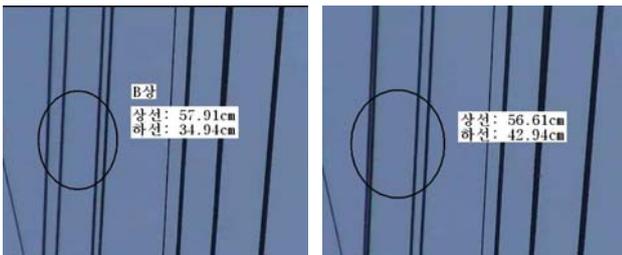
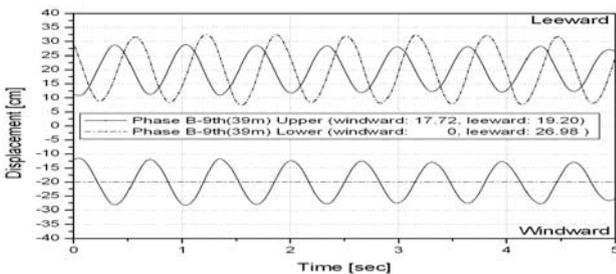


그림 6 표3의 1번 진동발생 예
Fig. 6 Oscillation phenomena in no.1 of the table 3

㉠ 복도체 스페이스 설치시 서브스판진동 현상

아래의 진동분석 결과는 상기 ㉠번 항목의 위치에서 복도체 스페이스가 설치된 경우 같은 조건에서 진동발생이 나타나지 않은 현상을 보여주는 것이다. 꾸준한 관측 결과 본 구간에서는 풍속이 다소 높게 발생한 경우에도 서브스판진동은 전혀 발생하지 않고 매우 안정적인 것으로 나타났다.

또한 표4의 14·15번과 같이 복도체 스페이스를 제거한 후 또 다시 진동이 발생됨에 따라 복도체 스페이스가 서브스판 진동저감에 효과가 매우 크다는 것을 보여준다.

표 4 #1B 9번째 진동 발생내용 분석

Table 4 Oscillation Analysis of the 9th subspan in #1B

번호	측정일	진동기록 및 분석시간	풍속 [m/s]	복도체 설치 유무	서브스판 진동 발생 유무
1	07.6.29	16:20~16:27	8	미설치	진동발생
2	07.10.29	09:57~11:45	9	설치	진동없음
3	07.11.6	11:30~12:14	9		
4~12	- 중략 -				
13	08.3.31	16:05~16:40	11.4	08.4.2 제거	진동발생
14	08.5.6	15:05~15:10	9.8		
15	08.5.7	15:25~15:28	5		

㉡ [표2]의 #1A 4번째 서브스판진동 현상

㉢ 복도체 스페이스 미설치시 서브스판진동 현상

이 실험경간은 3상 모두가 같은 조건에서 스페이스덤퍼가 설치되어 있어서 진동현상 비교가 용이한 구간이다. 같은 50m 간격의 서브스판에 대해 #1B, #1C상에는 각각 복도체 스페이스를 설치하고, #1A상에는 설치하지 않는 상태에서 비교한 결과 #1A상에서만 서브스판 진동이 확인되었다.

아래의 진동분석 결과는 표 2의 #1A상 4번째 서브스판에서 발생한 서브스판진동 현상으로서, 복도체 스페이스가 설치되어 있지 않은 조건에서 발생한 예이다.

표 5 #1A 4번째 서브스판 진동 발생

Table 5 Oscillations on the 4th subspan in #1A

번호	진동 기록 시간	진동분석 시간대[sec]	진동 발생내용
1	2007.11.1일 15:27:00~17:17:42	15:55:11~15:55:16	A상 서브스판 진동발생
2	2008.1.23일 10:50:00~11:50:00	10:53:16~10:53:21	
3	2008.1.24일 10:07:00~10:47:00	10:19:35~10:19:40	
4	2008.2.1일 09:28:00~10:08:00	09:36:04~09:36:09	

번호	풍속 [m/s]	풍향 [deg]	진동주파수 (상선/하선) [Hz]	진동최대진폭 (p-p) [cm]			
				상선		하선	
				풍상	풍하	풍상	풍하
1	9.6	225	1.03/0.92	2.14	6.77	0	2.26
2	6.9	225	0.94/0	2.26	9.04	0	0
3	6.5	210	1.03/0	1.37	12.31	0	0
4	5.3	225	1.03/0	0	7.8	0	0

표 5의 1번 항목에 대한 진동발생 예는 그림 7과 같다.

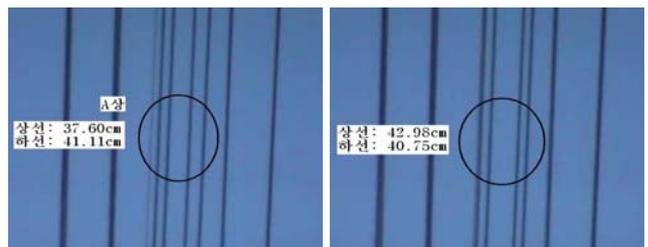
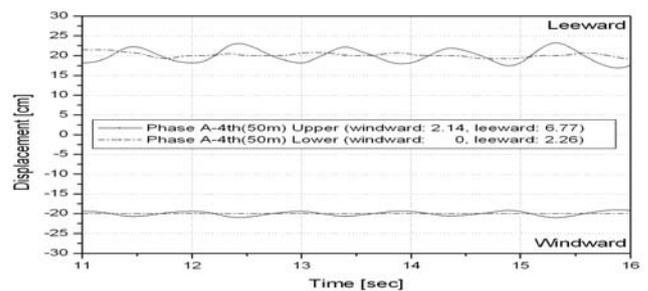


그림 7 표5의 1번 진동발생 예
Fig. 7 Oscillation phenomena in no.1 of the table 5

㉔ **복도체 스페이서 설치시 서브스판진동 현상**

아래의 진동분석 결과는 표 2의 #1A 4번째 소경간에서 복도체 설치유무에 따른 서브스판 진동 발생 내용을 분석한 결과이다. 서브스판진동이 측정된 #1A상 4번째 경간에 복도체 스페이서를 추가설치(08.4.2)해 본 결과, 설치 후 측정에서는 전혀 진동이 발생하지 않는 것으로 표 6과 같은 시험 결과를 얻었다. 같은 구간, 비슷한 풍속에서 진동발생이 확연한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 또한 오전, 오후의 시간대로 분류하거나, 최대풍속 11.7m/s일 경우에도 복도체 스페이서 설치시에는 서브스판 진동이 일어나지 않음을 보여주고 있다.

표 6 #1A 4번째 진동 발생내용 분석

Table 6 Oscillation Analysis of the 4th subspan in #1A

번호	측정일	진동기록 및 분석시간	풍속 [m/s]	복도체 설치 유무	서브스판 진동 발생유무
1	07.11.1	15:27~17:17	9.6	미설치	진동발생
2	08.1.23	10:50~11:50	6.9		
3	08.1.24	10:07~10:47	6.5		
4	08.2.1	9:28~10:08	5.3		
5	08.4.24	10:30~11:50	6	08.4.2 추가 설치	진동없음
6	08.4.28	15:47~17:06	6.4		
7~10	- 중략 -				
11	08.6.23	14:14~16:36	11.7		

3. 결 론

국내 4도체 가공선로에서 가장 문제가 되는 서브스판진동 발생 다발 소경간에 대한 대책으로 복도체 스페이서의 적용 방안을 제시하였고, 이의 타당성을 검증하기 위해 실험적인 측면에서 실제 345kV 영포선로를 이용하여 실험하였다. 실험결과 복도체 스페이서를 적용할 경우 서브스판 진동이 확실히 저감됨을 알 수 있었다. 즉, 복도체 스페이서 설치유무에 따라 서브스판진동 발생의 차이가 분명하게 나타났으며, 실험결과 분석에 의하면 복도체 스페이서를 설치한 서브스판에서 실질적인 진동발생은 없었던 것으로 나타났다. 이러한 실험결과를 통해 4도체 가공선로에서 서브스판 진동 발생 다발구간에 복도체 스페이서를 설치할 경우 진동저감 효과가 확실히 나타남을 알 수 있다.

따라서 본 제안방식을 적용할 경우 매우 경제적인 진동대책이 가능할 것이며, 이러한 연구결과는 앞으로 국내 4도체 가공선로에서 매우 유용한 진동대책으로 활용될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] 김우겸, 이달형, 신점식, 이형권, “345kV 가공선로에서 진동발생 다발 소경간에 대한 진동저감 대책(I)”, 전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.7.18-20
 [2] 이형권, 유철환, “4도체 송전선로 진동현상 조사 분석 (I)”, 전기학회 하계학술대회 논문집, 2001.11.16

[3] 이형권, “송전선로에서 스페이서덤펀 적정 설치방안 연구”, 전기학회 하계학술대회 논문집, 2002. 7

저 자 소 개



이형권 (李亨勸)

1983년 명지대 전기공학과 졸업. 1985년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1984년 3월~ 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 책임연구원
 Tel : 055-280-1340
 E-mail : hklee@keri.re.kr



한형주 (韓亨周)

2004년 동아대 전기공학과 졸업. 2006년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2006년 2월~ 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 위촉연구원
 Tel : 055-280-1342
 E-mail : hjhan@keri.re.kr