

# 크랙을 갖는 헬리컬스프링의 자유진동해석

## Free Vibration Analysis of Helical Springs with Crack

김월태\* · 이현승\*\* · 이영신\*\*

Woeltae Kim · Hyunseong Lee · Youngshin Lee

**Key Words** : Helical Spring(헬리컬 스프링), Vibration Analysis(진동 해석), Natural Frequency(고유진동수), 크랙(Crack)

### ABSTRACT

Free vibration analysis of helical spring with crack was studied. Natural frequency changes due to the crack was analyzed with respect to crack locations. The effect of crack on natural frequency was decreased as crack location is further from the fixed end of a spring. The frequency change was larger in rectangular-shaped spring than that in circular-shaped spring. It was found that experiment may not be appropriate to determine the presence of crack because no significant natural frequency change can be shown by experiment.

### 1. 서 론

크랙과 같은 결함을 갖는 구조물이나 기기에 외력이 가해지면 크랙부위를 기점으로 균열이 시작된다. 따라서 크랙을 갖는 구조물이나 기기의 거동에 대한 연구는 구조물의 설계단계 뿐만 아니라 사용 중인 구조물이나 기기의 건전성을 확인하는 측면에서도 상당히 중요하다. 구조물이나 기기에 크랙이 존재하는 경우 강성 감소로 인한 고유진동수 감소 등 동적 거동에 큰 영향을 미치며 고유진동수 변화를 이용한 크랙의 확인방법에 관한 연구가 널리 수행되고 있다<sup>(1)</sup>.

스프링은 대부분의 기계장치에서 충격 완화 혹은 에너지의 저장목적으로 사용되며 헬리컬 압축 코일 스프링이 널리 사용되고 있다. 헬리컬 압축 스프링에 스프링 축방향으로 하중이 가해지면 와이어 반경 방향으로 비틀림 응력이 발생하며 반대로 와이어 반경 방향의 비틀림 응력은 축방향의 압축 혹은 인장 응력을 유발하는 등 상호작용을 하

게 된다. 이러한 비틀림 응력과 인장 혹은 압축 응력의 상호 작용으로 인해 스프링은 비선형 거동을 보이고 비선형성은 스프링 구조물의 응력 및 진동해석에 상당한 어려움을 야기 시킨다.

헬리컬 압축 코일 스프링에서 가장 응력이 크게 걸리는 부분은 항상 코일 안쪽이며 피로 파괴는 코일 안쪽에서 시작한다는 것이 통설이었으나<sup>(2)</sup>, M. T. Todinov는 스프링 반경 대 와이어 반경 비, 즉 스프링 지수가 20 이상인 스프링은 코일의 바깥쪽에 최대 응력이 걸리고 피로 파괴는 코일의 바깥쪽에서 시작한다는 연구결과를 제시하였다<sup>(3)</sup>.

한편 원자력 발전소 증기발생기의 U-튜브가 결함을 가질 때의 진동 특성의 변화에 대한 연구에서 축방향의 크랙은 크랙의 크기에 관계없이 고유진동수의 변화가 거의 나타나지 않으나 원주방향으로 270도를 넘는 크랙에 대해서는 고유진동수가 감소하기 시작함을 보였으며, 축방향 크랙은 고유진동수에 크게 영향을 미치지 못하며 원주방향 크랙에 대해서도 미소한 크랙은 고유진동수에 영향을 거의 미치지 않음을 보였다<sup>(4)</sup>.

헬리컬 스프링의 진동특성에 대한 이론적 해석은 1960년대 Wahl에 의해 수립되었다. 그는 양단 고정된 헬리컬 스프링의 고유진동수를 아래의 식으로 표현하였으며, 축방향의 2차이상의 고유진동수는 기본 고유진동수의 자연수의 배수로 나타남을 보여주었다.

\* 한국원자력안전기술원  
E-mail : wtkim@kins.re.kr  
Tel : (042) 868-0226, Fax : (042) 861-2535

\*\* 충남대학교

$$f = \frac{Nr}{8\pi nR^2} \sqrt{\frac{2G}{\rho}} \quad (Hz)$$

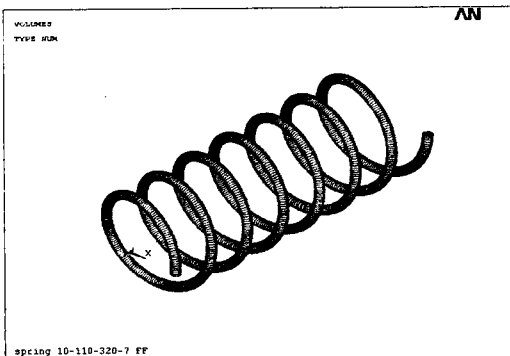
N : 모드번호, r : 와이어 반경, n : 코일 감김수,  
R : 코일 반경, G : 전단 탄성계수, ρ : material density

그러나 실제 해석결과 스프링의 고유진동수는 Walh이 제안한 이론식과는 다소 차이가 있으며<sup>(5)(6)</sup>, 설계 시 해석이나 실험을 별도로 수행하여 보다 정확한 진동해석이 요구된다.

본 연구에서는 크랙이 없는 상태에서의 압축 헬리컬 스프링의 고유진동수 및 진동모드와 크랙이 있는 상태에서의 고유진동수 및 진동모드를 비교함으로써 크랙의 위치와 크기가 스프링의 고유진동수에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 유한요소 해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS<sup>(7)</sup> 프로그램을 사용하였다.

## 2. 유한요소 해석

유한요소는 원통 좌표계를 기반으로 구성하였다. 자유도의 수는 6개(x, y, z 각 방향의 처짐과 회전)에 대한 자유도이며, 스프링 모델링은 와이어반경(r) 5mm, 코일반경(R) 55mm, 총 높이 340mm, 코일 감김수(n) 7회전인 원통형 헬리컬 스프링을 기본으로 하였다. 재료 물성치는 포와송비 0.28, 밀도 7800kg/m<sup>3</sup>, 탄성계수 2.09 × 10<sup>11</sup>N/m<sup>2</sup>을 사용하였다. 총 요소 수는 53,760개, 절점수 63,897개, 요소형식은 Solid45를 사용하였다. <그림1>은 ANSYS를 이용하여 구현한 모델링을 보이고 있다.



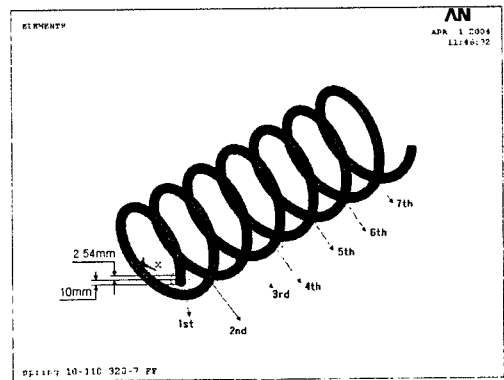
<그림1> 유한요소 모델

### (1) 크랙의 위치에 따른 고유진동수 변화

크랙의 크기와 위치가 헬리컬 스프링의 고유진동수에

미치는 영향을 확인하기 위해 일부 요소에 인위적으로 크랙을 가상하였다. 크랙은 기구성된 유한 요소의 일부를 삭제(delete)하는 방법으로 형성하였다. 크랙은 코일 축에 직각하는 원주방향으로 와이어의 윗부분에 생성시켰다. 크랙의 크기는 깊이 5mm, 폭 2.45mm로 하였다. 깊이는 와이어 직경의 반에 해당된다.

크랙의 위치는 첫 번째 회전에서는 고정된 위치로부터 10mm 떨어진 곳을 선정하였고, 두 번째, 세 번째, 네 번째 회전에서는 각 회전의 시작부위에 두었다. 양단 고정인 경계조건에 대해서 5회전 이상의 와이어에 대칭이므로 해석을 생략하였다.



<그림2> 스프링 와이어의 크랙의 위치

<표2-1>에 양단고정인 경계조건에 대해 크랙이 없는 경우와 크랙이 있는 경우의 고유진동수의 변화를 비교하였다. 고유진동수 변화량과 감소율은 <표2-2>에 정리하였다. 기본 고유진동수의 감소율을 살펴보면, 첫 번째 와이어에 크랙이 존재하는 경우 감소율은 0.923%이고, 두 번째 와이어에 크랙이 있는 경우는 0.455%, 세 번째 와이어의 크랙에서는 0.251%, 네 번째 와이어 크랙은 0.060%로 나타나 크랙의 위치가 고정점으로부터 멀어질수록 고유진동수 감소율이 작아짐을 보였다. 이는 2번에서 4번까지의 고유진동수에서도 동일한 경향을 나타내었다. 그러나 5번 모드 이상에서는 첫 번째 와이어에 크랙이 있는 경우에는 고유진동수가 감소하였으나 나머지 와이어의 크랙에 대해서는 고유진동수가 감소하거나 증가하는 등 크랙의 위치에 따라 고유진동수 증감이 혼재하는 양상을 보여 주었다. 각 와이어에 크랙이 존재할 때 세 번째 고유진동 모드까지의 고유진동수 감소 경향을 <그림3>에 나타내었다.

일단고정 및 타단자유 경계조건에서 크랙의 위치에 따른 고유진동수 변화를 확인하기 위해 고정단을 기준으로 하여 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7번째 와이어에 크랙을 모사하였다. 크랙의 위치는 양단고정과 동일하게 첫 번째 회전 와이어는 고정단으로부터 10mm 떨어진 곳에 2.45mm폭으로 반경

깊이까지 크랙이 있다고 가정하고, 나머지 와이어에 대해서는 회전이 시작하는 곳을 기준으로 동일 크기의 크랙이 존

고유진동수 감소율이 작아짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 <그림4>에서 그래프를 통하여 확인하는 바와 같다.

Mode No.	No crack (Hz)	1st turn crack (Hz)	2nd turn crack (Hz)	3rd turn crack (Hz)	4th turn crack (Hz)
1	38.25	37.90	38.08	38.16	38.23
2	39.36	39.09	39.27	39.28	39.28
3	43.34	43.06	43.17	43.22	43.33
4	46.98	46.41	46.53	46.78	46.98
5	79.52	78.98	79.44	79.49	79.34
6	83.49	82.99	83.32	83.24	83.43
7	87.21	86.07	86.76	87.16	86.91
8	91.68	90.57	91.35	91.64	90.61
9	117.01	116.62	117.02	116.73	116.90
10	127.50	126.00	127.39	127.34	127.14
11	130.37	130.32	130.01	129.84	130.21
12	135.73	132.75	135.35	134.28	134.56
13	147.82	147.35	147.69	147.57	147.66
14	162.75	159.86	161.79	162.13	162.10
15	162.85	162.79	162.59	162.80	162.85

<표2-1> 양단고정 시 크랙 위치에 따른 고유진동수 변화

Mode No.	No crack (Hz)	1st turn crack (Hz)	2nd turn crack (Hz)	3rd turn crack (Hz)	4th turn crack (Hz)	5th turn crack (Hz)	6th turn crack (Hz)	7th turn crack (Hz)
1	7.65	7.49	7.55	7.59	7.63	7.64	7.65	7.66
2	7.67	7.58	7.61	7.64	7.66	7.67	7.68	7.68
3	21.05	20.95	20.95	20.97	20.99	21.02	21.04	21.06
4	23.73	23.66	23.67	23.68	23.69	23.71	23.72	23.73
5	37.42	36.90	37.34	37.36	37.19	37.12	37.25	37.39
6	37.82	37.56	37.78	37.76	37.61	37.57	37.67	37.80
7	62.38	62.10	62.18	62.38	62.36	62.15	62.08	62.27
8	70.24	70.06	70.15	70.27	70.23	70.09	70.07	70.19
9	82.44	81.64	82.31	82.06	82.32	82.18	81.71	82.13
10	83.84	83.46	83.78	83.48	83.76	83.65	83.20	83.53
11	101.46	101.08	101.27	101.39	100.97	101.43	101.19	100.98
12	113.58	113.33	113.58	113.48	113.30	113.60	113.40	113.32
13	125.13	124.62	124.50	124.78	124.60	124.59	124.62	124.17
14	127.13	126.27	126.94	126.93	126.93	126.77	126.99	126.57
15	137.26	137.07	137.04	136.85	137.19	136.63	137.21	136.38

<표3-1> 일단고정 타단자유 시 크랙의 위치에 따른 고유진동수 변화

1st turn crack		2nd turn crack		3rd turn crack		4th turn crack	
$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)
0.353	0.923	0.174	0.455	0.096	0.251	0.023	0.060
0.265	0.673	0.093	0.236	0.083	0.211	0.077	0.196
0.285	0.658	0.173	0.399	0.123	0.284	0.009	0.021

$\Delta\omega$  = Frequency Change

$\omega$  = Frequency with crack - Frequency without crack

$\omega$  = Frequency without crack

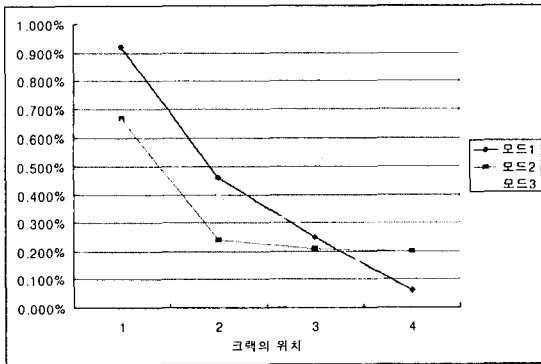
<표2-2> 양단고정 시 크랙 위치에 따른 고유진동수 감소율( $\Delta\omega/\omega$ )

진동수 감소 $\Delta\omega$ (Hz)	Mode No.	No crack	1st turn crack	2nd turn crack	3rd turn crack	4th turn crack	5th turn crack	6th turn crack
	1	0.16	0.100	0.060	0.020	0.010	0.000	-0.010
2	0.09	0.060	0.030	0.010	0.000	-0.010	-0.010	
3	0.10	0.100	0.080	0.060	0.030	0.010	-0.010	

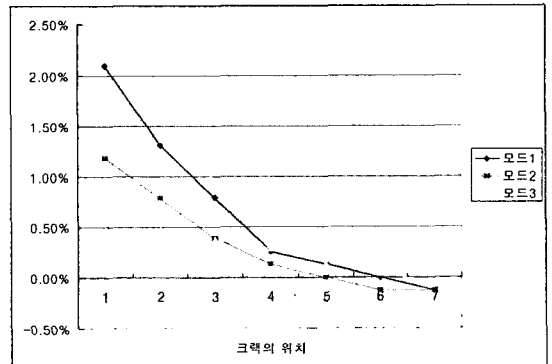
  

진동수 감소율 (%)	Mode No.	No crack	1st turn crack	2nd turn crack	3rd turn crack	4th turn crack	5th turn crack	6th turn crack
	1	2.09	1.31	0.78	0.26	0.13	0.01	-0.13
2	1.17	0.78	0.39	0.13	0.00	-0.13	-0.13	
3	0.48	0.48	0.38	0.29	0.14	0.05	-0.05	

<표3-2> 일단고정 타단자유 시 크랙 위치에 따른 고유진동수 감소율( $\Delta\omega/\omega$ )



<그림3> 양단고정 시 크랙의 위치에 따른 고유진동수 감소율( $\Delta\omega/\omega$ )



<그림4> 일단고정 타단자유시 크랙 위치에 따른 고유진동수 감소율( $\Delta\omega/\omega$ )

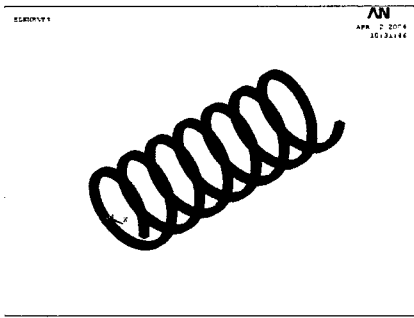
재한다고 가정하였다. 일단고정 및 타단자유 경계조건에서 각 회전수 와이어에 대한 고유진동수 변화 및 진동수감소율은 <표3-1> 및 <표3-2>와 같다. 표에서 보는 바와 같이 고정단에서 가장 가까운 첫 번째 와이어에 크랙이 존재할 때가 가장 큰 고유진동수 감소를 보이고 있고, 크랙이 고정단에서 두 번째, 세 번째 및 네 번째 와이어로 멀어질수록

<그림3> 및 <그림4>에서 확인한 바와 같이 양단고정 경계조건이나 일단고정 타단자유 경계조건 공히 크랙이 고정단에서 가까울수록 고유진동수 감소가 크고, 고정단에서 멀어질수록 감소 정도가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 일단

고정 및 타단자유 경계조건에서 크랙이 고정단으로부터 멀어 질수록 감소 정도가 둔해지다가 5번째 와이어에서 일부 증가 경향을 보이다가 6번째 와이어는 공히 고유진동수가 증가하였다.

**(2) 정사각 단면 스프링의 크랙 위치에 따른 고유진동수 변화**

동일한 크기의 크랙이 정사각 단면의 스프링에 존재할 경우 고유진동수가 어떻게 변하는 지에 대하여 살펴보았다. 스프링의 크기 및 물성치는 원형 단면 스프링과 동일하며 원형 단면과 동일한 면적을 갖도록 한 면을 8.8mm로 정하였다. <그림5>는 정사각 단면을 갖는 스프링의 모델링 형상이다.



<그림5> 정사각 단면을 갖는 스프링의 모델링 형상

사각 단면 스프링의 해석에서 경계조건은 원형 단면 스프링과 동일하게 양단고정으로 하고, 크랙의 위치와 크기 또한 동일하게 하였다. 유한요소 해석결과는 <표4>와 같다.

<표4-1> 크랙 유무에 따른 양단고정 정사각 단면 스프링의 고유진동수 변화

Mode No.	No Crack (Hz)	With Crack (Hz)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)
1	37.59	37.12	0.47	1.242
2	39.32	38.99	0.33	0.842
3	42.22	41.86	0.37	0.867
4	48.33	48.17	0.16	0.325
5	76.95	76.58	0.37	0.481
6	83.74	83.22	0.53	0.627
7	86.57	85.96	0.61	0.703
8	94.26	93.90	0.36	0.378
9	112.69	112.26	0.43	0.382
10	127.93	127.23	0.70	0.547
11	130.81	130.65	0.16	0.122
12	138.25	137.46	0.79	0.571
13	142.78	142.30	0.48	0.336
14	162.69	162.37	0.32	0.197
15	163.04	162.70	0.34	0.209

<표4>에서 보는 바와 같이 원형 단면을 가지는 스프링과 정사각 단면을 가지는 스프링이 동일한 크기의 결함이 동일

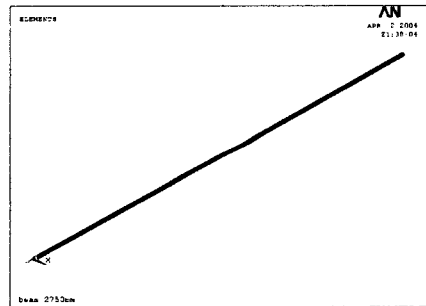
한 위치에 존재할 때 정사각 단면 스프링의 1차 고유진동수 감소율은 1.242%이고, 원형 단면 스프링의 고유진동수 감소율은 0.923으로 확인되었다. 두 번째 및 세 번째 고유진동수 모드에서도 정사각 단면 스프링에서의 고유진동수 감소율이 더 크게 나타났으며 전체적으로 정사각 단면의 고유진동수 감소율이 원형 단면의 감소율보다 25%이상 더 큼을 확인하였다.

<표4-2> 크랙이 존재할 때 양단고정 원형 단면 스프링과 정사각 단면 스프링의 고유진동수 감소율

Mode No.	Circular Wire		Rectangular Wire		(*-*)*
	$\Delta\omega$ (Hz)	$[\Delta\omega/\omega](\%)*$	$\Delta\omega$ (Hz)	$[\Delta\omega/\omega](\%)**$	
1	0.353	0.923	0.47	1.242	0.346
2	0.265	0.673	0.33	0.842	0.251
3	0.285	0.658	0.37	0.867	0.317

**(3) 원형 봉과 원형 스프링의 크랙 위치에 따른 고유진동수 변화**

원통형 헬리컬 스프링과 동일한 길이를 가지는 원형 봉에 대하여 크랙의 위치에 따른 고유진동수 변화를 고찰하였다. 원형 봉의 길이는 원형 스프링을 펼친 길이인 2,750mm로 하였다. <그림6>은 원형 봉의 모델링 형상을 보이고 있다.



<그림6> 2750mm 원형봉의 모델링

<표5> 원형 스프링과 동일 길이를 갖는 양단고정 원형 봉의 크랙에 의한 고유진동수 변화

Mode No.	No Crack (Hz)	With Crack (Hz)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)
1	13.697	13.165	0.532	3.88
2	13.697	13.588	0.109	0.80
3	37.74	36.396	1.344	3.56
4	37.74	37.45	0.29	0.77
5	73.944	71.517	2.427	3.28
6	73.944	73.395	0.549	0.74
7	122.15	118.44	3.71	3.04
8	122.15	121.27	0.88	0.72
9	182.31	177.19	5.12	2.81
10	182.31	181.04	1.27	0.70
11	254.37	247.73	6.64	2.61
12	254.37	252.66	1.71	0.67
13	338.26	330.04	8.22	2.43
14	338.26	336.07	2.19	0.65
15	433.9	424.06	9.84	2.27

크랙의 위치는 앞의 스프링 해석 시와 마찬가지로 고정 단으로부터 10mm 떨어진 곳에 두었으며 경계조건은 양단 고정으로 하였다. <표5>에서 확인하는 바와 같이 크랙이 있는 경우의 고유진동수는 크랙이 없는 경우에 비해 1차 모드에서 약 3.88%의 고유진동수 감소율을 보였다. 이는 앞에서 원형 단면 스프링의 0.923%, 정사각 단면 스프링의 1.242%에 비해 상대적으로 큰 고유진동수 감소를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 모드 차수가 올라갈수록 고유진동수 감소율이 점점 작아짐을 볼 수 있다. 한편 원형 빔에서 크랙이 존재하는 경우에는 유사한 크기를 갖는 진동수 쌍이 나타났다. 즉 크랙이 없는 경우 1차 모드의 고유진동수는 13.694Hz이었으나 크랙이 존재하는 경우에는 13.165Hz와 13.588Hz 등 유사한 값을 가지는 고유진동수 쌍이 보였다. 이러한 현상은 전체 고유진동수에서 동일하게 나타났다.

한편 동일 단면적의 원형 봉에서 길이를 300mm로 짧게 한 경우에 대하여 크랙 유무에 따른 고유진동수 변화 및 진동감소율에 대하여 알아보았다. <표6>에서 보는 바와 같이 고유진동수는 봉의 길이가 짧아짐에 따라 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 1차 모드에서의 고유진동수 감소율은 8.77%로 나타났다. 크랙이 있는 경우의 고유진동수 쌍이 나타나는 현상은 원형 스프링과 동일 길이를 갖는 원형 봉의 크랙에 의한 고유진동수 변화와 동일하게 나타났다. 동일한 단면의 원형 봉의 길이가 짧아질수록 동일한 고유진동수 감소율은 커진다.

Mode No.	No Crack (Hz)	With Crack (Hz)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)
1	507.73	463.19	44.54	8.77
2	507.73	495.39	12.34	2.43
3	1390.10	1311.40	78.70	5.66
4	1390.10	1365.30	24.80	1.78
5	2701.00	2601.20	99.80	3.69
6	2701.00	2665.30	35.70	1.32
7	4415.50	4310.70	104.80	2.37
8	4415.50	4370.80	44.70	1.01
9	5391.90	5234.00	157.90	2.93
10	6510.50	6410.50	100.00	1.54

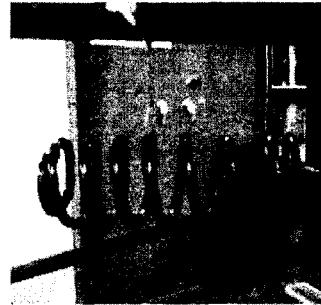
<표6> 길이 300mm 양단고정 원형 봉의 크랙에 의한 고유진동수 변화

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

원통형 헬리컬 압축 코일 스프링에 크랙이 존재할 때에 고유진동수의 변화를 확인하는 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 스프링은 스프링 높이 320mm 스프링 와이어 직경 10mm, 코일직경 110mm이며, 코일감수는 7회전 및 1/4회전이다. 실험은 양단자유 경계조건에서 수행하였고 <그림7>은 스프링 실험 장치이다. 양단자유 경계조건은 스프링의 중앙을 실로 묶어 매달아 구현하였으며, 진동측정용 충격해머

로 이용하여 가진 하였다. 신호는 축방향으로 부착한 가속도계를 통하여 취득하였고 취득한 신호는 개인용 컴퓨터에 설치된 Star-System으로 분석하였다. 가속도계는 1방향 신호 취득용이며 PCB Piezotronics를 사용하였다. 가속도계의 voltage sensitivity는 9.83mv/g이며 사용범위는 3-10000Hz이다.



<그림7> 진동실험에 사용될 헬리컬스프링

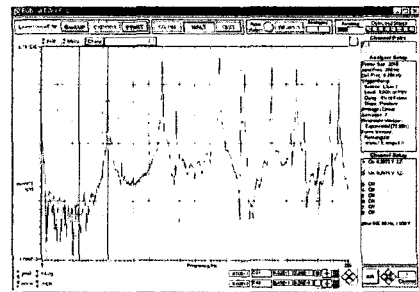
#### 3.2 실험결과

크랙이 없는 스프링과 크랙을 모사한 스프링에 대해 각각 5회의 실험을 수행하였으며 취득된 신호로부터 산술평균으로 고유진동수를 취득하였다. 3차 모드까지의 고유진동수를 확인하였으며 진동실험 결과는 <표7>, <그림8> 및 <그림9>와 같다. 실험결과는 양단자유 경계조건에서 해석한 유한요소 해석결과와 비교하였다. 크랙은 두 번째 와이어의 회전이 시작하는 곳에 반경 깊이까지 폭 1mm의 크기로 생성하였다.

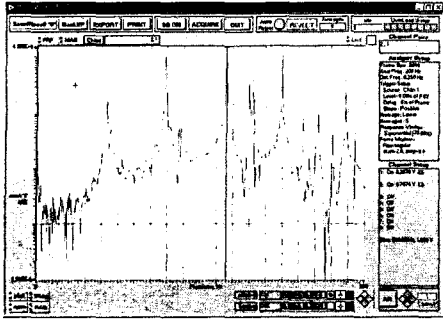
<표7>에서 보는 바와 같이 유한요소 해석에서는 크랙이 있는 경우 0.3% 미만의 고유진동수 감소를 나타내었으나 진

Mode No.	FEM				Experiment			
	no crack (Hz)	with crack (Hz)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)	no crack (Hz)	with crack (Hz)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\Delta\omega/\omega$ (%)
1	41.69	41.68	0.01	0.02	43.2	43	0.2	0.46
2	80.29	80.22	0.07	0.08	79	79	0	0
3	116.42	116.10	0.28	0.27	116	116	0	0

<표7> 양단자유 경계조건에서의 유한요소해석 결과와 진동 실험결과의 비교



<그림8> 크랙이 없는 스프링의 고유진동수



<그림9> 크랙이 있는 스프링의 고유진동수

동 실험으로는 1차 모드에서만 0.46%의 고유진동수 감소를 보였을 뿐 나머지 모드에서는 고유진동수의 변화를 확인할 수 없었다.

#### 4. 결론

상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 원통형 압축 코일 스프링에 원주방향 크랙이 존재할 때 고유진동수에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 본 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 크랙이 스프링의 고유진동수에 미치는 영향은 크랙의 위치가 고정단으로부터 멀어질수록 감소한다.
- (2) 크랙으로 인한 스프링의 고유진동수 감소율은 양단 고정 경계조건이 일단 고정 및 타단 자유 경계조건보다 25% 이상 크다.
- (3) 동일 단면적과 길이를 가지는 경우, 크랙으로 인한 고유진동수 변화정도는 정사각 코일 스프링이 원형 코일 스프링보다 크다.

(4) 진동실험으로 크랙이 존재하는 스프링의 고유진동수 변화를 확인하기가 곤란하다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Hassiotis, S, 2000, "Identification of Damage Using Natural Frequencies and Markov Parameters", Computers and Structures, Vol. 74(2000), pp.365-373
- (2) Harold Calson, 1980, "Springs, Trouble Shooting and Failure Analysis", Marcel Dekker, Inc.
- (3) Todinov, M. T., 1999, "Maximum Principal Tensile Stress and Fatigue Crack Origin for Compression Springs", International Journal of Mechanical Sciences Vol. 41, pp.357-370.
- (4) Jo, J.C., Jung, M.J., Kim, W.S., Kim, H.J., 2003, "Flow-Induced Vibration Characteristics of Steam Generator U-Tubes with Defect," ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Cleveland, USA, July 2003, PVP-Vol.454, pp.13-19.
- (5) Lee, J. and Thompson D. J., 2001, "Dynamic Stiffness Formulation, Free Vibration and Wave Motion of Helical Springs", Journal of Sound and Vibration Vol. 239, No. 2, pp.297-320.
- (6) Yildirim, Vebil, 1996, "Investigation of Parameters Affecting Free Vibration Frequency of Helical Springs", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 39, pp.99-114.
- (7) ANSYS, 2001, ANSYS Structural Analytical Guide, Inc., Houston.