

# 수평 전단시험에 의한 납 삽입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가<sup>(1)</sup>

## Mechanical Characterization of Lead-Rubber Bearing by Horizontal Shear Tests

토의자 : 김 두 훈\* · 정 길 영\*\*

Discussion by Kim, Doo Hoon and Chung, Gil Young

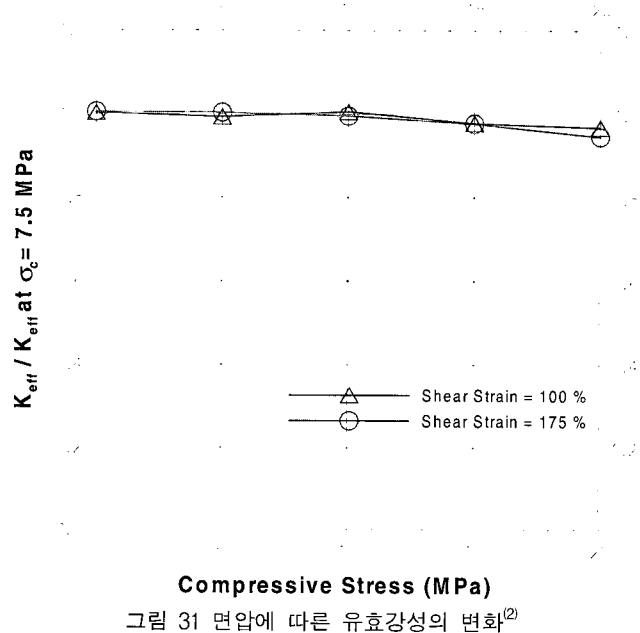
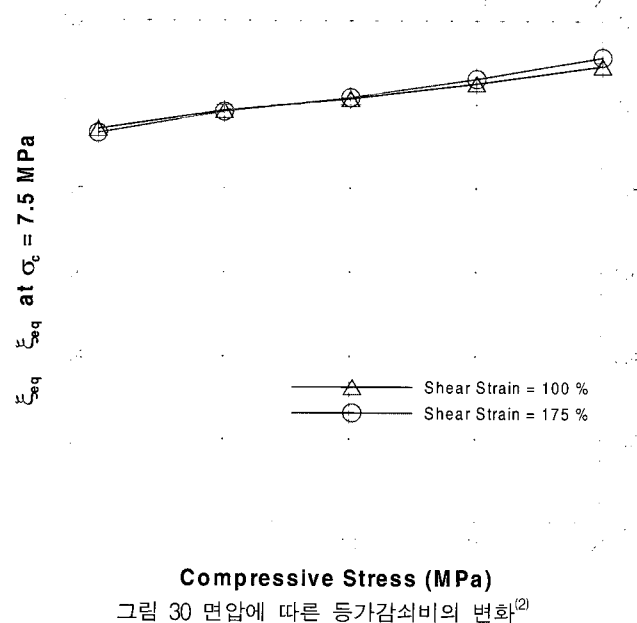
토의자는 원 논문과 관련된 저자의 결론에 대하여 몇 가지 상이한 의견과 그 근거자료를 다음과 같이 제시합니다.

논문에서 1개의 시험체를 시험하기 위하여 시험장치에 설치한 미끄럼면의 마찰이 과도한 것으로 판단됩니다. 참고문헌 [3]은 1개의 시험체를 사용하기 위하여 설치된 마찰면의 마찰력이 수평력의 1%를 넘으면 보정하라고 제시하고 있습니다. 마찰력의 기여도가 크다는 것은 원 논문의 그림 14부터 그림 18까지의 연직하중별 이력곡선의 폭이 과도하게 차이나는 것을 통해 알 수 있으며, 그림 23을 통해서도 쉽게 추정할 수 있습니다. LRB의 경우 연직하중이 증가하면 등가감쇠비는 그림 23과 같이 증가하는 경향을 보이고 있으나 그 변화량이 그림 23에 나타난 바와 같이 300%에 달하지는 않습니다. 연직하중의 크기에 따라 등가감쇠비의 변화량이 약 300%에 달할 정도로 과도하지 않다는 것은 참고문헌 [2]에서 인용한 그림 30과 참고문헌 [4]에서 인용한 그림 32에 나타난 등가감쇠비의 변화율을 통해 알 수 있습니다. 과도한 마찰력의 보정이 이루어지지 않은 시험결과인 그림 22를 토대로, 원 논문의 4.2절에 “LRB는 연직하중이 클수록 큰 유효강성을 갖는 것으로 나타났다”라고 표현한 것으로 사료됩니다. 그러나 참고문헌 [2]와 [4]의 시험결과를 그림 31와 그림 32에 나타내었으며, 본 그림들의 경우에 연직하중이 증가하면 LRB의 유효강성은 오히려 감소하는 것으로 나타나고 있습니다.

LRB의 가진진동수에 따른 소산에너지 변화가 기존의 연구결과와 상이합니다. 즉 기존 연구자료들에 의하면 가진 진동수가 증가하면 고무의 이력감쇠가 증가하고 내부에 삽입된 납의 전단강도가 증가하기 때문에 LRB의 유효강성과 소산에너지(EDC)가 증가합니다.<sup>(1),(2),(4)</sup> 그러나 원 논문의 4.1절의 그림 21을 살펴보면 가진진동수가 증가함에 따라 소산에너지가 오히려 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 이는 저진동수부터 고진동수로 실험을 수행하는 과정에서 이전 시험 단계에서 발생한 LRB 상승열의 냉각시간이 충분하지 못하였기 때문인 것으로 판단됩니다. 따라서 원 논문의 결과는 LRB의 온도상승이 다수 반영되었다고 보여지며, 이러한 결과를 통한 유효강성 및 등가감쇠 등의 특성파악은 재고가 필요하다고 사료됩니다.

끝으로, 원 논문의 4.3절에 나타난 재하 사이클에 대한 특성

에 관한 기술에 다음과 같은 의견이 있습니다. 여러 자료들에 의하면 LRB의 반복재하 특성은 재하 사이클이 증가할수록 납과 고무의 온도상승으로 인하여 유효강성과 등가감쇠비가 모두 감소하는 경향을 나타내고 있습니다. 이는 참고문헌 [2]에서 인용한 그림 33과 참고문헌 [4]에서 인용한 그림 34에 나타나 있습니다. 그러나 원 논문의 4.3절과 결론에는



(1) 원저자 : 전영선, 최인길, 유문식, 제5권, 제6호/2001년 12월  
\* 정희원 · 유니슨기술연구소, 연구소장(kimdh@unison.co.kr)  
\*\* 유니슨기술연구소, 선임연구원(cgy@unison.co.kr)

“재하 사이클이 증가할수록 유효강성은 증가하며 소산에너지와 등가감쇠비의 값은 감소하는 경향을 보인다”라고 표현되어 있습니다. 이러한 원 논문의 유효강성에 대한 결론은 그림 25에 기초한 것으로 보여집니다. 그러나 토의자는 그림 21에서 가진 진동수별 시험시 사용한 최소 변형율에 대한 1번째 사이클이 작다는 결론 이외에, 반복 재하가 증가하면서 유효강성이 증가한다는 결론을 얻기 힘들다고 판단합니다.

LRB의 힘-변위 이력곡선에서 1번째 곡선의 유효강성은

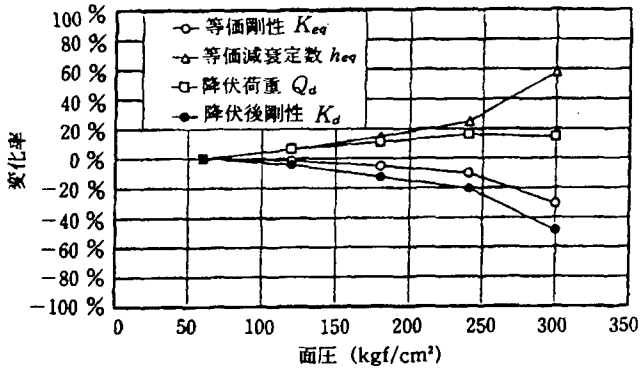


그림 32 LRB의 면압의존성<sup>(4)</sup>

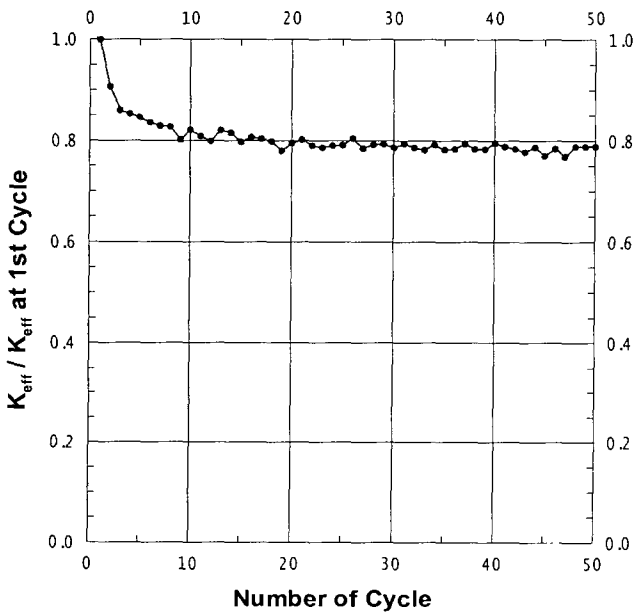


그림 33 반복재하시 유효강성의 변화<sup>(2)</sup>

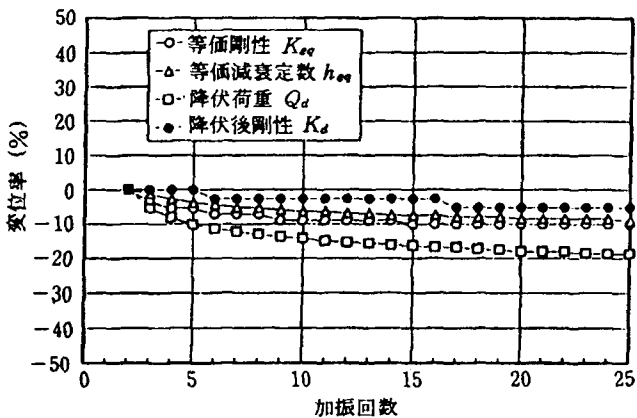


그림 34 LRB의 반복재하특성<sup>(4)</sup>

작은 변형율에서는 다른 사이클에 비하여 작게 나타나며, 일정 변형율 이상에서는 크게 나타나고 있습니다. 이는 그림 35와 36을 통하여 확인할 수 있습니다. 이렇듯 LRB의 변위별 특성을 가지고 재하 사이클의 특성으로 확대 해석하는 것은 무리가 있다고 보여집니다.

토의자는 원 논문에 대하여 이상과 같은 의견을 드리니 검토 부탁드립니다.

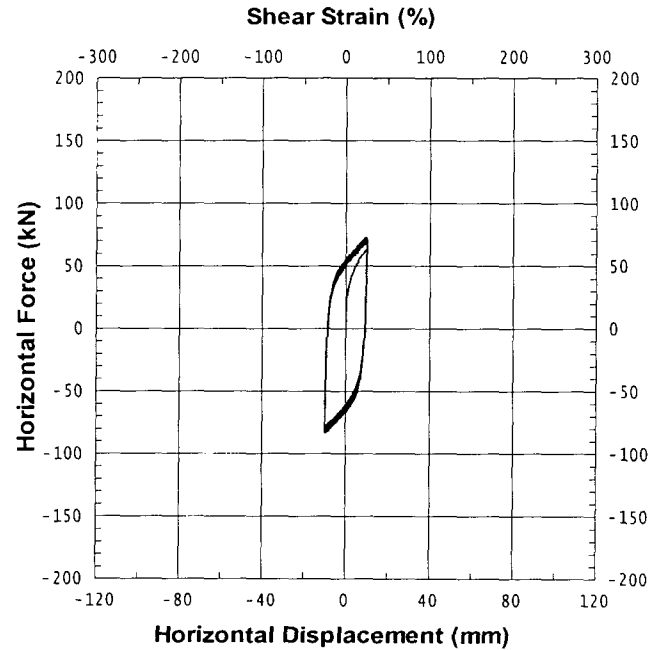


그림 35 전단변형율 25%에서의 이력곡선<sup>(2)</sup>

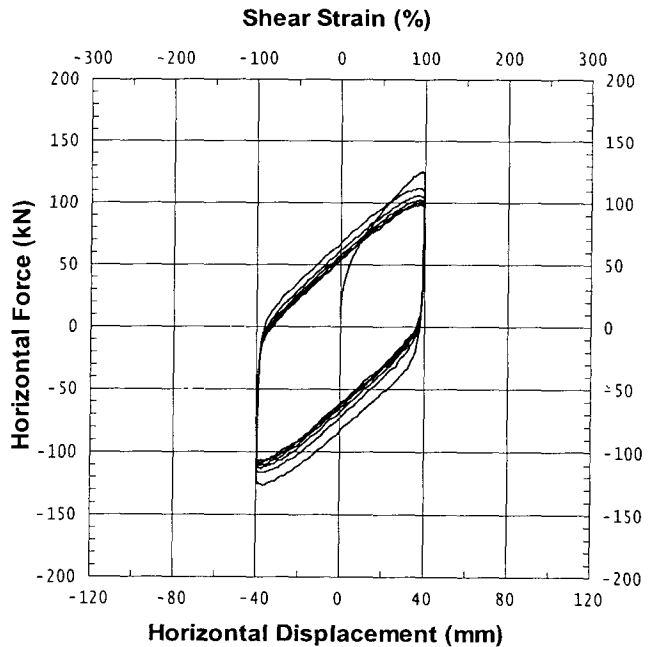


그림 36 전단변형율 100%에서의 이력곡선<sup>(2)</sup>

참고 문헌

1. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and McVerry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, 1993.

2. Unison R&D Center, "Prototype test results of natural rubber bearing and lead rubber bearing," 2001.
3. "ISO Standard Specification - Rubber products - Laminated rubber bearings for seismic protection of bridges," Final draft prepared by Japanese party, 2000.
4. "免震用積層ゴムハンドブック", (社)日本ゴム協會, 免震用積層ゴム委員會, 理工圖書(株), 2000.

회답자: 전영선  
 Closure by Choun, Young Sun

질의자께서 제시하신 의견을 다음의 세 가지로 요약할 수 있을 것 같습니다.

- (1) 마찰의 영향이 과도하게 포함되어 있어서 면압에 대한 등가감쇠비의 변화량이 크게 평가되었으며 연직하중이 클수록 큰 유효강성을 얻게 되었다. 이전 연구결과에서는 연직하중이 증가할 때 유효강성이 감소하였다.
- (2) 저진동수로부터 고진동수로 실험이 진행되는 중에 발생하는 열이 충분히 냉각되지 못해 온도상승의 영향으로 소산에너지의 변화가 기존의 결과와 상이하다.
- (3) 변형률의 크기에 따라서 첫 번째 사이클에서의 크기가 다르게 나타나므로 변위특성에 근거한 재하사이클의 특성분석은 무리가 있다.

이상의 질의사항에 대한 저자의 소견은 다음과 같습니다.

**질문 (1)에 대한 의견 :**

원 논문<sup>(1)</sup>의 그림 14-18은 연직하중의 증가에 따른 LRB의 이력곡선입니다. 50tonf 이상의 연직하중에 대한 실험결과에

마찰의 영향이 과도하게 포함되어 있는 것은 그림으로부터 알 수 있습니다. 이는 본문에서도 기술한 바와 같이 연직하중 증가에 따른 LRB 특성변화의 전반적인 특성을 정성적으로 파악하는데 크게 영향을 미치지 않을 것이라는 저자의 판단에 의한 것입니다. 따라서 토의자께서 지적하신 바와 같이 등가감쇠비의 변화량이 과도하게 평가되었다는 것은 타당한 지적이라 할 수 있습니다. 다른 동적실험결과<sup>(2)</sup>에 의하면 표 3~6과 그림 37에서 보는 바와 같이 면압이 0에서 10.34MPa (1,500psi)로 증가함에 따라 등가감쇠비의 변화량은 약 25%의 증가를 나타내었다. 본 실험에서도 면압이 0에서부터 9.2MPa까지 증가하므로 이와 유사한 등가감쇠비의 증가가 예상됩니다.

그러나 유효강성의 경우에는 토의자께서 지적하신 바와 같이 연직하중이 증가할 때 유효강성이 반드시 감소한다고는 말할 수 없을 것입니다. 표 3~6과 그림 38에서 보는 바와 같이 변형률 100%이내에서는 면압이 클 경우 유효강성이 큰 결과를 보이고 있습니다. 따라서 본 논문의 변형률 구간 50%이내에서는 면압이 증가할수록 큰 유효강성을 갖는 결과가 타당하다고 할 수 있을 것입니다. 토의자께서 제시하신 면압에 따른 등가감쇠비와 유효강성의 변화(그림 30, 31)는 전단변형률이 100%와 175%의 두 경우를 비교한 결과로서 본 논문의 실험결과와 직접적으로 비교하기에는 부적합하다고 생각합니다. 또한 그림 32에서도 면압과 변형률이 작은 경우에는 그 경향이 뚜렷이 나타나지 않고 있습니다.

**질문 (2)에 대한 의견 :**

원 논문의 실험은 토의자께서 기술한 바와 같이 하나의 LRB에 대하여 저진동수로부터 고진동수로 진동수를 변화시키면서 실험을 수행한 것이 아니라 본 논문의 그림 7에서 보는 바와 같이 하나의 LRB에 대하여 동일한 진동수를 유지하면서 수평변위를 변화시킨 입력을 사용하였습니다. 따라서

표 3 연직하중 P=0psi에 대한 LRB의 동적특성<sup>(2)</sup>

BEARING ID : HR030-4 EERC ID : No. 3 VERTICAL PRESSURE : 0 PSI													
File No.	901023.22					901023.23				901023.24			
$\gamma$ (±)	10%	25%	50%	75%	100%	100%	150%	200%	250%	200%	250%	300%	350%
K(1st cy)	12.58	9.22	7.28	5.89	5.14	4.86	4.53	4.41	4.62	3.28	3.84	4.5	4.49
Kips in(5th cy)	11.21	8.75	6.54	5.45	4.67	4.61	3.94	3.80	3.74	3.13	3.48	3.52	3.62
$\beta$ (1st cy)	12.25	12.24	12.01	11.95	12.09	13.18	12.17	11.39	9.97	13.64	10.02	8.74	7.89
(%)(5th cy)	13.39	13.14	12.06	12.09	13.86	12.01	12.70	11.61	10.61	13.22	10.47	9.4	8.4
WD(1st cy)	0	1	4	6	10	11	21	35	50	31	43	62	70
Kips-in(5th cy)	0	1	3	6	11	10	19	30	43	29	39	52	60
G(1st cy)	311	228	180	145	127	120	112	109	114	81	95	111	111
Ksi(5th cy)	277	216	162	135	115	114	97	94	93	77	86	87	90

\* 정회원 · 한국원자력연구소, 책임연구원

표 4 연직하중 P=500psi에 대한 LRB의 동적특성<sup>2)</sup>

BEARING ID : HR030-3 EERC ID : No. 2 VERTICAL PRESSURE : 500 PSI													
File No.	901023.16					901023.17				901023.18			
$\gamma(\pm)$	10%	25%	50%	75%	100%	100%	150%	200%	250%	200%	250%	300%	350%
K(eff)(1st cy)	13.11	10.22	7.77	6.43	5.56	5.27	4.89	4.6	4.61	3.4	3.79	4.46	4.5
Kips in(5th cy)	12.7	9.41	7.08	5.79	4.98	4.94	4.15	3.78	3.71	3.18	3.49	3.6	3.62
$\beta$ (1st cy)	10.22	12.91	12.6	12.15	12.8	13.39	12.85	12.11	10.59	14.2	13.68	9.06	8.42
(%)(5th cy)	11.21	11.65	11.87	12.77	14.03	13.56	13.55	12.89	11.88	14.49	11.3	9.98	9.06
WD(1st cy)	0	1	4	7	11	12	24	38	53	33	44	63	77
Kips-in(5th cy)	0	1	3	7	11	11	22	34	48	31	42	56	67
G(1st cy)	324	253	192	159	137	130	121	114	114	84	94	110	111
Ksi(5th cy)	314	232	175	143	123	122	103	93	92	79	85	89	89

표 5 연직하중 P=1,000psi에 대한 LRB의 동적특성<sup>2)</sup>

BEARING ID : HR030-2 EERC ID : No. 1 VERTICAL PRESSURE : 1000 PSI													
File No.	901023.04					901023.05				901023.06			
$\gamma(\pm)$	10%	25%	50%	75%	100%	100%	150%	200%	250%	200%	250%	300%	350%
K(eff) (1st cy)	12.66	9.61	7.36	5.89	5.08	4.87	4.58	4.53	4.83	3.31	3.91	4.65	4.75
Kips in (5th cy)	12.71	8.6	6.32	5.41	4.72	4.55	3.9	3.77	3.84	3.13	3.54	3.7	3.71
$\beta$ (1st cy)	13.71	12.99	12.48	13.24	14.01	15.45	13.86	12.24	10.57	15.68	10.99	9.11	8.29
(%) (5th cy)	13.73	11.08	14.07	15.1	14.91	15.03	14.66	13.02	11.31	15.25	11.74	10.18	9.46
WD (1st cy)	0	1	4	7	11	13	24	38	55	50	45	64	78
Kips-in (5th cy)	0	1	3	7	11	12	22	34	48	31	43	57	70
G (1st cy)	313	237	182	145	125	120	113	112	119	82	97	115	117
Ksi (5th cy)	314	213	156	134	117	113	96	93	96	77	87	92	92

표 6 연직하중 P=1,500psi에 대한 LRB의 동적특성<sup>2)</sup>

BEARING ID : HR030-5 EERC ID : No. 4 VERTICAL PRESSURE : 1500 PSI													
File No.	901023.10					901023.11				901023.12			
$\gamma(\pm)$	10%	25%	50%	75%	100%	100%	150%	200%	250%	200%	250%	300%	350%
K(eff)(1st cy)	15.76	11.04	8.56	6.13	5.09	4.66	4.38	4.28	4.33	2.97	3.52	4.15	4.2
Kips in(5th cy)	11.31	8.45	6.32	5.08	4.48	4.36	3.74	3.46	3.44	2.77	3.14	3.23	3.19
$\beta$ (1st cy)	12.71	14.52	14.34	14.84	16.39	17.13	15.77	14.06	12.81	18.58	13.24	10.85	9.92
(%)(5th cy)	14.64	14.75	14.52	15.97	16.52	16.16	16.96	15.46	13.67	17.61	14.11	12.4	11.59
WD(1st cy)	0	1	4	8	13	13	26	41	60	37	50	70	85
Kips-in(5th cy)	0	1	4	7	12	12	24	36	50	33	48	62	75
G(1st cy)	389	273	211	151	126	115	108	106	107	73	87	103	104
Ksi(5th cy)	279	209	156	125	111	108	92	86	85	68	78	80	79

진동수의 변화로 인한 LRB의 상승열은 포함되어 있지 않은 것으로 생각할 수 있습니다. 그러나 동일진동수 내에서의 반복재하로 인한 온도상승의 영향은 포함되어 있다고 할 수 있습니다. 실제 지진에 대한 LRB의 동적응답도 이러한 영향이 포함될 수밖에 없으므로 타당하다고

생각됩니다.

질문 (3)에 대한 의견 :

토의자께서 제시하신 전단변형률 25%와 100%에서의 이력

BRIDGESTONE-BEARING TEST  
DAMPING - STRAIN PLOTS  
pressure P=0 psi: □—□  
pressure P=500 psi: ○---○  
pressure P=1000 psi: △---△  
pressure P=1500 psi: ◇---◇  
Damping/Strain

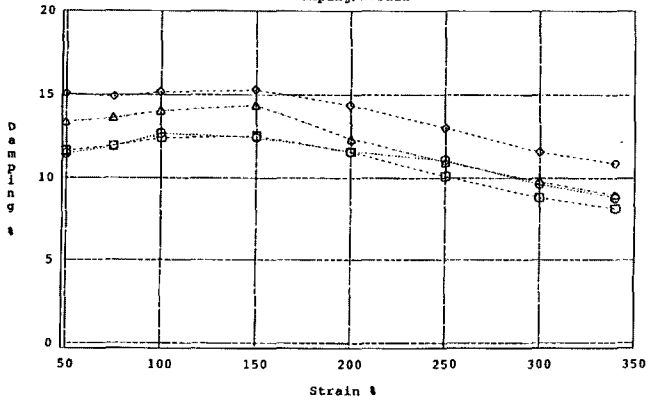


그림 37 면압에 따른 LRB 등가감쇠비의 변화<sup>(2)</sup>

BRIDGESTONE-BEARING TEST  
EFFECTIVE STIFFNESS - STRAIN PLOTS  
pressure P=0 psi: □—□  
pressure P=500 psi: ○---○  
pressure P=1000 psi: △---△  
pressure P=1500 psi: ◇---◇  
Effective Stiffness/Strain

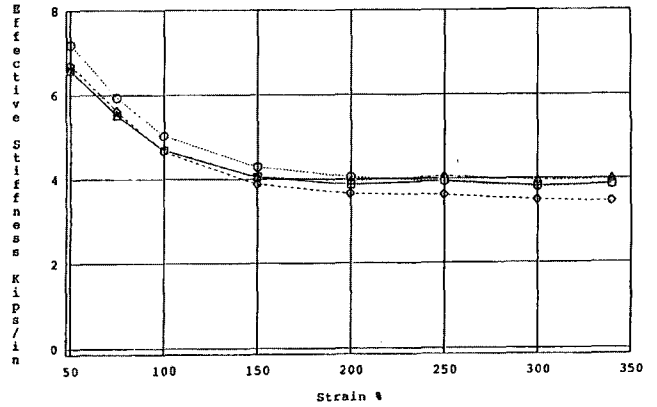


그림 38 면압에 따른 LRB 유효강성의 변화<sup>(2)</sup>

곡선(그림 35, 36)은 본 논문의 실험방법과는 차이가 있습니다. 본 논문의 실험에서는 10ton LRB에 대해서는 25%, 200ton LRB에 대해서는 10%의 변형률로부터 동적실험을 시작했습니다.(원 논문 그림 7참조) 그 결과 얻은 이력곡선이 원 논문의 그림 9~18로서 토의자께서 제시하신 그림 35와 같은 거동을 보이고 있습니다. 유효강성의 재하사이클에 의한 영향은 원 논문에서 기술한 바와 같이 크지 않음을 알 수 있습니다.

### 참고문헌

1. 전영선, 최인길, 유문식, "수평 전단시험에 의한 납 삼입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제6호, 2001.
2. Kelly, J. M., "Dynamic and failure characteristics of bridgestone isolation bearings," UCB/EERC-91/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1991. 4.