

철도차량용 세브론 스프링의 특성 평가

Evaluation of Characteristics of Chevron Spring for Rail Vehicle

김완두* 김완수* 우창수* 정승일** 김석원** 김영구**
W. D. Kim W. S. Kim C. S. Woo S. I. Jung S. W. Kim Y. G. Kim

ABSTRACT

A chevron rubber spring is used in primary suspension system for rail vehicle. The chevron spring has function which support the load carried and reduce vibration and noise in operation of rail vehicle. The computer simulation using the non-linear finite element analysis program MARC executed to predict and evaluate the load capacity and stiffness for the chevron spring. The appropriate shape and material properties are proposed to adjust the required characteristics of chevron spring in the three modes of flexibility. Also, several samples of chevron spring are manufactured and experimented. It is shown that the predicted values agree well the results obtained from experiments.

1. 서론

철도 차량의 1차 현가 장치 부품 중에 하나인 세브론 스프링(chevron spring)은 차량의 동력학적 특성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 차량의 주행 안정성 및 승차감에 중요한 역할을 한다. 특히, 차량의 운동에 따른 제반 정·동적 하중을 완화시켜 차량 부품 및 궤도의 손상을 방지하고 승객과 화물에 전해지는 진동·소음을 최소화 시켜 주는 역할을 수행한다[1].

지금까지 고무 스프링의 설계 시 경험을 바탕으로 한 시행 착오법을 통해 설계를 하였는데 이러한 방법은 제작 및 설계 시에 많은 시간과 경비가 소요되게 된다. 하지만, 최근 컴퓨터의 대형화와 관련 해석 소프트웨어의 발전으로 고무부품의 설계에도 전산해석을 통한 CAE 기술이 널리 이용되고 있으며 전산해석을 통하여 재질 및 형상의 선정시 시간과 비용을 절감할 수 있게 되었으며 보다 정확한 해석을 통하여 고무 스프링에 요구되는 특성에 맞는 주요 설계 변수의 영향을 파악할 수 있게 되었다[2][3]. 본 논문에서는 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC[4]를 이용하여 3축 방향 하중을 받는 고무 스프링의 강성을 예측, 분석하였고 시제품을 제작한 후 시험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 설계변수 및 유한 요소 모델링

2.1 세브론 스프링의 설계변수

철도차량의 1차 현가 장치로 쓰이는 세브론 스프링은 '갈매기모양(chevron)'의 금속판재와 고무가 적층되어 있는 구조로 한 개의 바퀴를 두 개가 길이 방향으로 양쪽에서 지지하게 되어 있다. 따라

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

** (주) 유일산업

서, 지면으로부터 전달되는 진동을 1차적으로 흡수하는 역할을 하게 되는데 정지 상태에서 정하중에 따른 수직 방향 강성뿐만 아니라 출발 및 정지 시의 길이 방향 강성(longitudinal stiffness)과 차방이 방향을 전환할 때 받는 횡 방향 강성(lateral stiffness)을 저절하게 유지시켜 주어야 한다. 그림 1은 세브론 스프링이 철도차량에 장착된 모습이다. 세브론 스프링의 특성에 영향을 주는 주요 변수는 고무의 물성, 적층 고무의 두께 및 중앙 여유공간의 유무, 세브론 각 등이며 유한요소 해석을 통하여 요구특성과 비교·검토하였다.



그림 1. 세브론 스프링

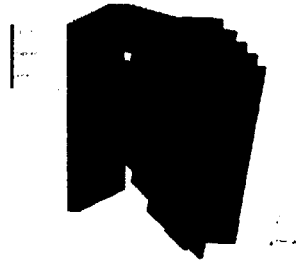


그림 2. 유한요소 모델링

2.2 세브론 스프링의 모델링

세브론 스프링의 유한요소모델은 3 방향의 해석을 각각 수행해야 하므로 3차원 모델링을 이용하였으며 요소 수는 8114개, 절점 수는 10682개이다. 그림 2는 세브론 스프링의 3차원 유한요소 모델링 형상이다. 사용된 고무는 천연고무로 비 압축성으로 가정하여 도표 1과 같이 시편의 인장, 압축, 전단 시험으로 응력-변형률 곡선을 구하고 비 선형 키르피팅을 통하여 얻어진 3항 오그덴 함수(Ogden model)를 이용하여 재료 상수값을 구하였다[5]. 고무와 접착되어 있는 금속판재와 브라켓의 Young's Modulus가 206GPa이고 프와송의 비는 0.3의 값을 사용하였다.

도표 1. Ogden constants of strain energy function of various specimens

경도44		경도50		경도60		경도66	
μ_i (MPa)	α_i	μ_i (MPa)	α_i	μ_i (MPa)	α_i	μ_i (MPa)	α_i
1.149E-2	0.4856E+1	-1.240E-6	0.1121E+2	-4.191E-4	0.6111E+1	-2.528E-5	7.175
3.423E-1	0.2401E+1	2.682E-1	0.3367E+1	3.623E-1	0.3333E+1	0.695	3.017
2.397E-14	-0.2249E+2	3.231E-14	-0.2249E+2	-2.903E-14	-0.2222E+2	-1.47E-8	-15.63

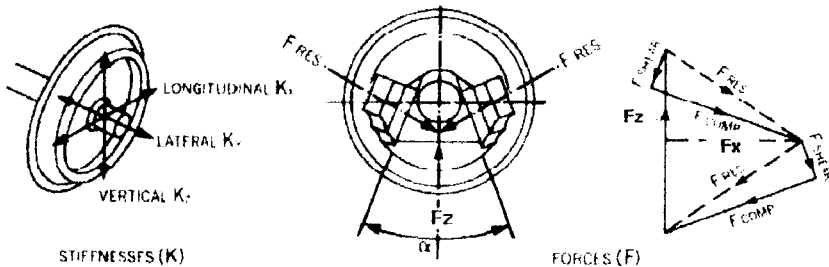


그림 3. 세브론 스프링의 하중 분력 선도

경계조건은 3축 방향에 대한 강성을 고려하기 위해 달리하였는데 수직 방향 하중(vertical force, F_z), 길이 방향 하중(longitudinal force, F_x), 횡 방향 하중(lateral force, F_y)이 각각 작용할 때의 강성을 알아보았다. 그림 3은 세브론 스프링에 작용하는 3축 방향의 하중 분력선도를 나타낸다. 세브론 스프링의 가장 오른쪽 금속판은 완전 고정시키기 위해 x, y, z 변위를 모두 구속시켰으며 브라

켓과 대차 프레임의 좌측 체결부의 x, y, z 변위를 변화 시켰다. 철도차량의 바퀴 1개당 세브론 스프링 2개가 지지하게 되어 있어 전동차의 경우 공차(Tare) 상태일 때 40kN, 만차(Crush) 상태일 때 75kN의 하중을 받고 객차의 경우 41.7kN, 54.9kN을 각각 받는다. 도표 2는 세브론 스프링에 요구되는 특성 값이다.

도표 2. Specifications of chevron spring

종 류	Unit	전 동 차		객 차	
		공차(40.0kN)	만차(75.0kN)	공차(41.7kN)	만차(54.9kN)
수직방향 강성(Vertical Stiffness, K_z)	kN/mm	2.0	2.0	1.02	1.00
횡 방향 강성(Lateral Stiffness, K_y)	kN/mm	9.9	10.8	4.9	5.2
길이방향 강성(Longitudinal Stiffness, K_x)	kN/mm	21.5	24.8	12.0	13.5
수직방향 변위(Vertical displacement)	mm	20	37.5	41	55
수직방향하중(F_z)	kN	20	37.5	20.95	27.45

3. 유한요소 해석 결과

세브론 스프링의 해석은 각 방향의 강성을 구하기 위해서 우선 수직 방향 강성을 구한다. 그리고 요구되는 특성과 비교해 적절한 물성(경도)을 찾아내고 그 값으로 길이 방향 강성과 횡 방향 강성을 구한다. 길이 방향 강성과 횡 방향 강성은 각각 일정 수준(공차, 만차)의 수직하중을 받은 상태에서 추가적인 하중(길이 방향 하중, 횡 방향 하중)을 작용시켜 구하게 된다.

3.1 수직 방향 해석

수직방향의 강성을 구하기 위해 대차 프레임 체결부의 상단 부분을 수직-압축방향으로 40mm의 변위를 주었다. 그림 4에서 (a)는 40mm의 수직 압축 변위를 주었을 때의 수직방향 변위 분포이고 (b)는 40mm의 수직 압축 변위를 주었을 때의 최대 주 변형률 분포이다. 변형률은 그림 4의 (b)에서 보는 바와 같이 하단부 첫 적층 고무 중앙 부분에서 0.91로 가장 크게 나타났다.

그림 5는 한 개의 세브론 스프링에 작용하는 하중-변위 관계선도를 경도에 따라 나타낸 것이다. 이러한 결과로 도표 3은 수직방향 강성을 계산한 것이다. 여기서, 강성 및 수직 변위 그리고 하중은 하나의 바퀴 축 박스를 지지하는 두 개의 세브론 스프링에 대한 값이므로 세브론 스프링 한 개를 해석한 결과하중의 2배가 최종 지지하중이 되는 것이다.

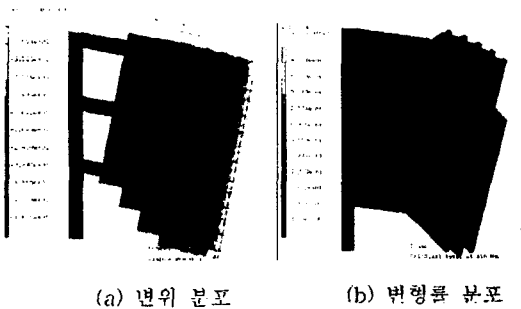


그림 4. 수직 방향 변위 및 최대 주 변형률 분포

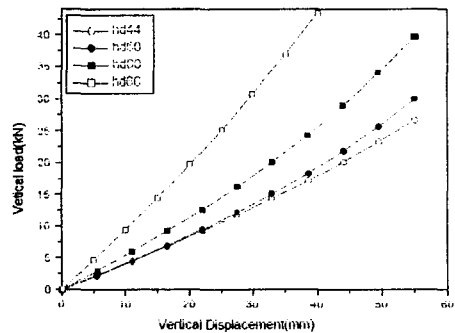


그림 5. 수직방향 하중-변위 선도

도표 3. 수직 방향 강성 해석 결과

종류	전동차용		객차용	
	경도 60	경도 66	경도 44	경도 50
공차 (kN/mm)	$14.93 \times 2/20.0 = 1.49$	$19.67 \times 2/20.0 = 1.97$	$18.9 \times 2/41 = 0.92$	$20.2 \times 2/41 = 0.99$
만차 (kN/mm)	$30.39 \times 2/37.5 = 1.62$	$40.21 \times 2/37.5 = 2.14$	$26.7 \times 2/55 = 0.97$	$30.0 \times 2/55 = 1.09$

3.2 길이 방향 해석

길이 방향 해석에서는 전동차의 경우 수직 변위가 공차는 20mm, 만차는 37.5mm에서 그리고 객차의 경우는 수직 변위가 공차는 41mm, 만차는 55mm에서 각각 길이 방향 변위가 ±10mm일 때의 세브론 스프링의 지지 하중을 구하였다.

그림 6 (a)는 경도 66의 경우 만차 상태에서 길이 방향으로 10mm를 압축하였을 때의 변위 모습이고 (b)는 최대 주 변형률 분포이다. 압축에서는 1.73, 인장에서는 0.88로 압축 과정에서 최대 주 변형률이 2배 이상 크게 나왔다. 그림 7은 만차 상태에서 압축 및 인장 시 길이 방향 하중을 나타낸 것이다.

길이 방향 강성을 구할 때 유의점은 그림 8과 같이 왼쪽 세브론 스프링이 압축하중을 받으면 오른쪽 스프링은 인장하중을 받게 되어 이 두 하중을 더한 값이 길이 방향 하중이 된다. 따라서, 길이 방향 강성은 식 (1)과 (2)와 같이 구할 수 있다. 도표 4는 10mm 길이 방향 변위를 주었을 때의 강성이다.

$$F_{total} = F_t + F_c = (K_t x_t + K_c x_c) = (K_t + K_c) \cdot x \quad (1)$$

$$K_{total} = K_c + K_t = \frac{F_{total}}{x} \quad (2)$$

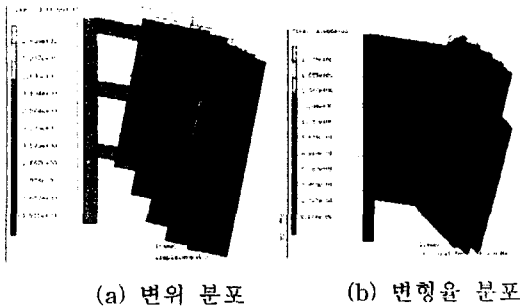


그림 6. 길이방향 변위 및 최대 주 변형률 분포

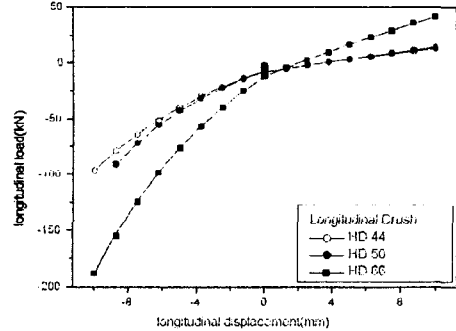


그림 7. 길이 방향 하중-변위 선도

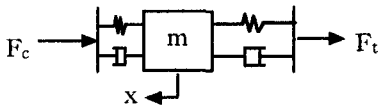


그림 8. 길이 방향 하중-변위 FBD

도표 4. 길이 방향 강성 해석 결과

종류	전동차용	객차용	
	경도 66	경도 44	경도 50
공차 (kN/mm)	19.6	9.66	11.03
만차 (kN/mm)	23.0	10.97	11.75

3.3 횡 방향 해석

횡 방향 해석에서는 길이 방향 해석과 마찬가지로 공차 및 만차 상태의 수직하중이 작용하고 추가적으로 횡 방향 변위가 4mm일 때의 하중을 비교하였다. 그림 9는 전동차의 만차 시 횡 방향으로 4mm의 변위를 주었을 때의 변위 및 최대 주 변형률 분포이다. 그림 10은 경도 66의 고무롤

사용할 때 공차, 만차일 때의 횡 방향 강성은 횡 방향 변위가 커질수록 강성이 조금 증가하는 비선형 특성을 보이고 있지만 열차의 요구 특성에 잘 부합되고 있음을 볼 수가 있다. 도표 5는 4mm 횡 방향 변위에서의 각 경도에 따른 횡 방향 강성을 계산한 것이다.

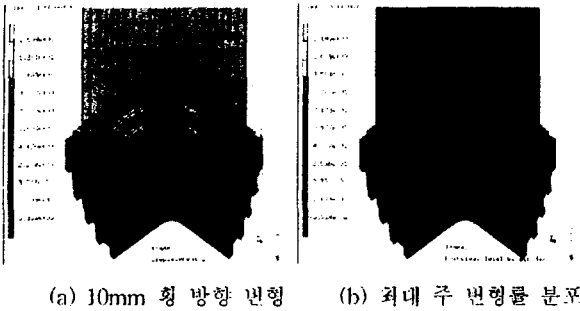


그림 9. 횡 방향 변형 및 최대 주 변형률 분포

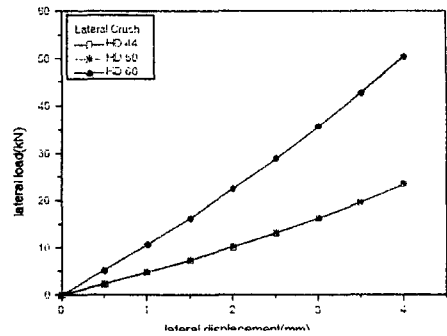


그림 10. 횡 방향 하중-변위 선도

도표 5. 횡 방향 강성 해석 결과

종류	객 차 용		
	전동차용 경도 66	경도 44	경도 50
공차 (kN/mm)	11.2	5.30	5.80
만차 (kN/mm)	12.6	5.87	7.42

3.4 적층 고무 형상 변화에 따른 영향

설계변수로 적층 고무 두께 변화와 여유공간 유무에 따른 영향을 알아보기 위해 두 가지 다른 모델을 적용시켜 보았다. model 1은 현 모델이고, model 2는 적층 고무 두께를 33% 감소시킨 모델이고, model 3은 중앙에 적층 고무의 여유 공간을 두지 않은 모델이다. 고무의 경도는 모두 66을 사용하였다. 그림 11은 각 모델을 수직방향 변위 40mm를 주었을 때 최대 주 변형률 분포를 비교한 것이다. 여유를 두지 않은 model 3에서 변형률이 집중되어 model 1보다 150% 이상의 심한 변형률이 생겼고 적층 고무 두께를 작게 한 model 3이 가장 큰 변형률을 보였다. 따라서 중앙에 공간을 두는 것이 변형률이 현저히 감소하므로 피로수명측면에서 좀 더 양호한 결과를 예측 할 수가 있다. 그림 12는 각 모델의 하중-변위를 비교 한 것인데 model 2, model 3, model 1 순으로 강성이 크게 나타났다.

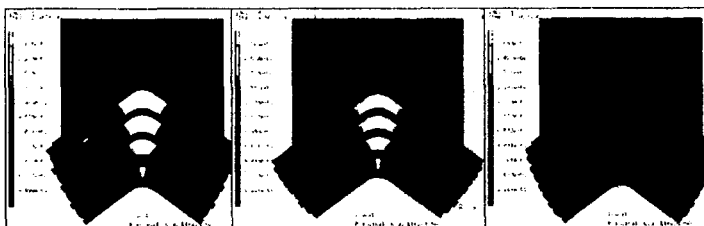


그림 11. 세 모델의 최대 주 변형률 분포 비교

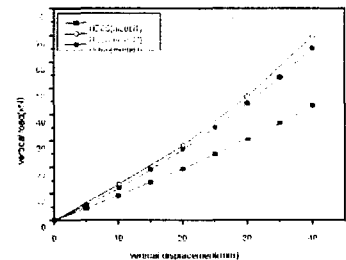


그림 12. 각 모델에 따른 하중-변위

3.5 세브론 각의 변화에 따른 영향

설계변수로 세브론 각의 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 두 가지 다른 모델을 적용시켜 보았다. 현재의 모델인 106°와 세브론 각을 10° 증가시킨 모델의 해석 결과, 도표 6과 같이 세브론

각을 증가시키면 수직 방향 강성, 길이방향 강성, 횡 방향 강성이 감소하는 경향을 보였다. 특히 횡 방향 강성이 가장 큰 변화를 보였고 수직방향 강성, 길이 방향 순으로 강성이 감소하였다. 강성을 높이기 위한 방법으로 세브론 각을 작게 해야 된다는 것을 해석 결과로부터 알 수가 있었다. 따라서 고무의 경도를 더 이상 높이지 않으면서 요구조건에 만족하는 강성을 세브론 각을 통해서도 조절할 수가 있는 것이다.

도표 6. 세브론 각에 따른 강성의 변화

강 성	하중조건	SPEC.(전동차)	106°	116°	변화율(%)
수직 방향	공 차	2.0	2.0	1.6	20.0% 감소
	만 차	2.0	2.1	1.8	14.3% 감소
길이 방향	공 차	21.5	19.6	17.5	10.7% 감소
	만 차	24.8	23.0	20.8	9.6% 감소
횡 방향	공 차	9.9	11.2	7.5	33.0% 감소
	만 차	10.8	12.6	8.3	34.1% 감소

4. 객차용 세브론 스프링 시제품 제작 및 특성시험

그림 13은 세브론 스프링의 시제품 제작을 위한 급형의 분해된 모습이며 그림 14는 조립된 모습이다. 객차용 세브론 스프링은 경도 45와 48의 고무를 사용하였다. 그림 15는 세브론 스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에 가장 기본이 되는 수직 방향 시험 모습이며 그림 16과 17은 각각 길이방향 및 횡 방향 시험 모습이다.

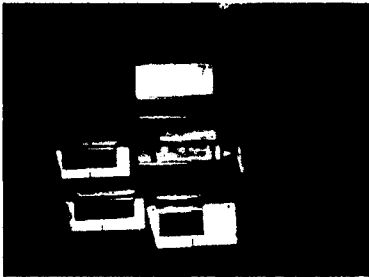


그림 13. 분해된 급형 형상

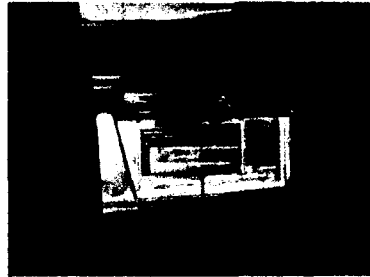


그림 14. 조립된 급형 형상



그림 15. 수직방향 시험



그림 16. 길이방향 시험



그림 17. 횡 방향 시험

4.1 수직방향 강성

그림 18은 수직방향 지지하중 측정 결과를 나타낸 것이다. 경도 45와 48 두 가지 경우의 수직방향 강성은 공차(tare)에서 1.03과 1.17, 만차(crush)에서는 1.03과 1.19로써 경도 45의 제품이 요구특성과 잘 일치하였으며 유한요소 해석 결과와도 잘 일치하였다.

4.2 길이방향 강성

길이 방향 시험 방법은 수직방향의 만차 변위 55mm를 가한 상태에서 길이 방향으로 ± 10 mm 변위를 주어 지지하중을 측정하였다. 그림 19는 길이 방향 지지하중 측정 결과를 나타낸 것이다. 경도 45와 48 두 가지 경우의 길이 방향 강성은 만차에서 각각 12.8, 13.3이 되어 요구조건과 잘 일치하였다.

4.3 횡 방향 강성

시험 방법은 수직방향의 하중을 가하지 않은 상태에서 ± 20 mm의 변위를 횡 방향으로 주어 횡 방향 지지 하중을 측정하였다. 그림 20은 횡 방향 지지하중을 측정한 결과이다.

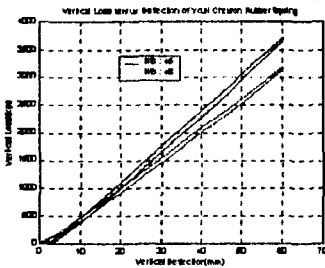


그림 18. 수직방향 하중-변위

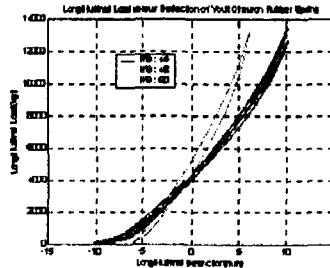


그림 19. 길이방향 하중-변위

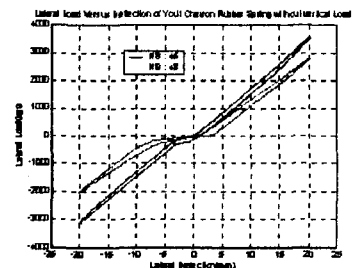


그림 20. 횡 방향 하중-변위

5. 결론

본 연구에서는 세브론 스프링의 특성을 비선형 유한요소해석을 이용하여 예측 및 분석하였고 시제품을 제작한 후 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고무 경도 변화에 따라 세브론 스프링의 강성은 민감하게 변화하며 개차용의 경우 경도 45, 전동차용의 경우 66의 고무를 사용할 경우 요구 특성과 잘 일치하였다.
- 2) 길이 방향 강성과 횡 방향 강성은 공차 보다 만차 상태에서 더 크게 나왔으며, 하중-변위 관계가 비 선형적인 특성을 보였다.
- 3) 적층되는 고무의 중앙에 공간이 있는 경우, 공간이 없는 경우에 비해 최대 수 변형률이 현저히 감소되어 피로수명 측면에서 유리한 형상임을 예측할 수가 있었다.
- 4) 세브론 각이 커지면 모든 방향의 강성이 감소하였으며, 세브론 각을 10° 키웠을 때 횡 방향 강성은 30% 이상 크게 감소하였다.

참고 문헌

1. 고속전철 현가장치 개발 연구보고서(1997), 96-II-5-2
2. 김완두 외(2000), “공기스프링용 코드강화 고무벨로우즈 국산화 개발 보고서”, 한국기계연구원
3. 김완두(1998), “고부 부품설계의 유한요소 해석기술 이용”, 기계저널, Vol.38, No.12, pp.49-54
4. Nonlinear FEA of Elastomer(1996), MARC Analysis Research Corporation, p.9
5. 김완두 외(1999), “초 탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술 개발”, 한국기계연구원 연구보고서, 과학기술부 98-NG-01-03-A-01

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비 요소기술 개발사업)으로 지원되어 수행하였습니다.