

야지 차량용 No Spin Differential 개발에 관한 연구

편영식¹⁾ · 장영도²⁾ · 이영춘³⁾ · 박정현¹⁾ · 여진욱⁴⁾

선문대학교 기계 및 제어공학부¹⁾ · 선문대학교 대학원 기계공학과²⁾ · 통일중공업(주)³⁾
· 선문대학교 생산시스템기술연구소⁴⁾

A Study on the Development of No Spin Differential for an Off-road Vehicle

Youngshik Pyoun¹⁾ · Youngdo Jang²⁾ · Youngchun Lee³⁾ · Jeonghyeon Park¹⁾ · Jinwook Yeo⁴⁾

¹⁾Division of Mechanical and Control Engineering, Sunmoon University, Chung-nam 336-708, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Sunmoon University, Chung-nam 336-708, Korea

³⁾Tongil Heavy Industries Company, #853-5 Wee-dong, Changwon-si, Geongnam 641-020, Korea

⁴⁾IMST, Sunmoon University, Chung-nam 336-708, Korea

(Received 12 May 2003 / Accepted 30 September 2003)

Abstract : NSD(No Spin Differential) has been developed for a military truck. A benchmarking study for USA and Russian NSD has been carried out. Axiomatic approach has been applied for improving the design. A test code for NSD has been developed and applied to the developed sample. In the test results of comparing the developed sample with the USA imported sample, three major characteristics- the noise, mobility and steerability - are in the range of the intended target. A practical process for the evolution design is proposed.

Key words : NSD(No Spin Differential), Off-road vehicle(야지차량), Design process(설계프로세스), Axiomatic approach(공리적 접근), Reverse engineering(역설계), NSD test code(NSD 시험방법)

1. 서론

1.1 NSD의 특성

자동차의 양쪽바퀴가 미끄러지지 않고 커브 길을 원활하게 돌려면 바깥쪽 바퀴가 안쪽 바퀴보다 더 많이 회전되어야 하며, 울퉁불퉁한 도로를 주행할 때에도 양쪽바퀴의 회전수가 달라야 하는데 이러한 작용을 하는 것이 차동기어 장치이다.¹⁾

또한 차량의 한쪽 바퀴가 웅덩이나 수렁에 빠졌을 경우 빠진 바퀴는 집착력을 잃고 공전하여, 타 바퀴에 회전력이 전연 전달되지 않아 주행할 수 없게 된다. 따라서 이러한 경우 차동장치의 작용을 멈추

게 하면 수렁에서 탈출할 수 있으므로 악로의 주행을 빈번히 하는 차량은 차동제한장치를 필요로 하며, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 LSD(Limited Slip Differential)가 개발되어 사용되고 있다.

이러한 용도로 개발되어 사용되고 있는 대표적인 LSD는 편심율(Locking ratio)과 기동성(Mobility)의 특성에 따라 Fig. 1과 같이 정리할 수 있다. 이중 NSD(No Spin Differential)는 기동성을 강화하기 위해 설계된 시스템으로 편심율이 100%로써, 진흙이나 웅덩이에 빠져도 Slip 되지 않고 쉽게 탈출할 수 있다.

미국 등 선진국에서는 기동성과 전술능력이 우수한 NSD를 1960년대부터 개발하여 군용 트럭 및 농기계와 같이 특수지형에 사용되는 차량에 많이 사

*To whom correspondence should be addressed.
jyd@kopo.or.kr

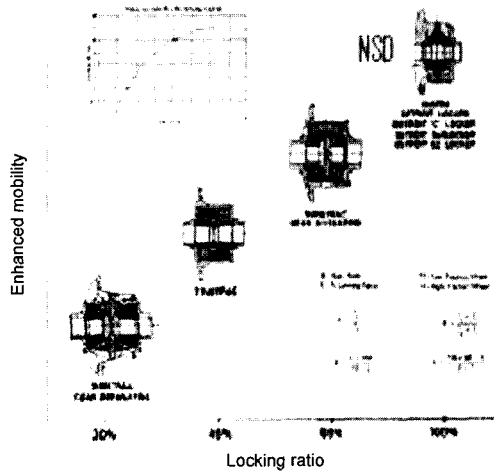


Fig. 1 Locking ratio and mobility of LSD/NSD

용하고 있다.

1.2 야지 차량용 NSD 개발의 필요성

국내에서는 현재까지는 야지에서 주행하고 있는 군용차량 중 트럭에 소량의 NSD를 수입하여 시험적으로 장착하여 왔으나, 향후에는 모든 군용 트럭에 이를 표준부품으로 장착할 계획이어서 수요가 크게 확대되고 있는 실정이다. 이는 험로 및 악로에서의 탈출이 용이하여 전술임무 수행 능력을 극대화시킬 수 있기 때문이다.

그러나 NSD를 개발한 국가에서는 주로 군사용으로 사용하기 때문에, 기술이전을 받고자 하여도 용이하지 않으며, 일부 국가에서는 기술이전 비용을 과다하게 요구함에 따라 국내에서 독자적으로 개발할 필요성이 대두되어 왔다.

1999년도 산업자원부로부터 민군겸용기술사업 연구개발과제중 하나인 “야지차량의 미끄럼 제한 차동장치 개발에 관한 연구” 과제로 선정되어 3년에 걸쳐 개발하여 왔다.²⁾

본 논문에서는 수요는 증가하고 있으나, 기술이전이 어렵고, 연구 및 개발이 전무한 상태에서 전량 수입에 의존하고 있는 NSD에 대한 고유 설계기술, 제작기술, 시험평가 방안 및 평가기준을 개발한 내용과 이러한 개선설계과정에 유용하게 사용된 설계 프로세스를 개발하여 보고한다.

2. 야지 차량용 NSD 개발

2.1 야지 차량용 NSD 개발절차

현재 선진 NSD를 수입하여 장착하고 있는 군용차종은 5톤, 2톤, 1톤 및 4톤 등이 있으나, 이 중 고가이며 기술적인 난이도가 가장 높다고 판단되는 5톤 트럭용 NSD를 우선적으로 개발하고자 한다. 장착될 5톤 트럭의 차량제원은 Table 1과 같다.³⁾

Table 1 The specification of NSD

항 목	제 원	
차 량 형 식	6륜 구 동	
엔 진	최 대 출 력	270 Hp / 2,200 rpm
	최 대 토크	100 kg-m / 1,400 rpm
차 량 총 중 량	20,516 kg	
전 차 축 하 중	4,950 kg	
후 차 축 하 중	15,516 kg	

야지 차량용 NSD에 대한 세부적인 개발절차는 Fig. 2와 같은 개선설계프로세스를 개발하여 적용하였다. 선진 제품을 입수하여 Reverse engineering을 통하여 NSD의 요구기능과 구현에 필요한 요소설계와 시스템구성에 대한 파악을 하면서 요구수명 및 정적파괴에 대한 안전계수와 강성에 대한 설계기준을 도출하였다. 이를 바탕으로 공리적 접근을 이용하여 설계평가를 실시하면서 특허를 회피할 수 있는 기본설계안을 결정하였다. 설계평가결과를 바탕

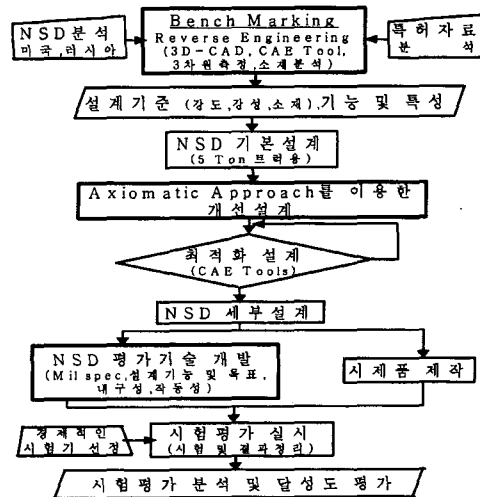


Fig. 2 Process for the evolution design of NSD

으로 공리적 접근을 이용하여 소비자의 요구를 보다 만족시킬 수 있는 개선설계를 실시하였다. 이렇게 구성된 시스템의 각 구성부품의 설계변수는 요구기능과 제약조건을 만족할 수 있도록 FEA 및 CAE 소프트웨어를 이용하여 결정하였다. 이렇게 완료된 세부설계도면을 활용하여 시제품을 제작하였고, 시험평가방안은 소비자의 요구기능을 만족시킬 수 있도록 기존의 평가방안과 설계과정에서 도출된 평가방안을 활용하여 개발하였다. 이러한 과정을 통해 개발 제안한 Fig. 2의 개선설계프로세스가 실용적이면서 효과적이라는 것을 확인하게 되었다.

2.2 선진 NSD 기술수준을 바탕으로 한 기본설계

2.2.1 선진 NSD 기술수준 분석

군용 및 특수차량에 사용되는 NSD를 국산화하기 위하여 기존에 사용되고 있는 선진국(미국, 러시아)의 NSD Sample을 입수하여 Reverse engineering-3차원 측정용 통한 2/3D 형상데이터, 재질, 열처리특성분석과 CAE Tool을 이용한 정/동특성 해석, 작동 Simulation 등-을 활용하여 NSD의 각종 설계기준 및 기능 등 각종 특성을 파악하였다. 또한 관련 특허자료와⁴⁾ NSD를 장착한 차량의 성능특성에 관한 자료를 활용하여 NSD의 기능과 설계특징을 분석하였고, 특허를 회피하는 방안도 연구하였다.

2.2.2 선진 NSD 제품 설계특징

미국과 러시아 NSD 제품의 공통적인 사항은 기존의 Gear drive를 그대로 이용하기 위해서 4개의 Pin을 가진 Spider를 이용하였고, 일반 Differential gear 위치에 NSD를 교체하여 사용하고 있다.

또한 NSD의 Center cam과 Driven clutch의 결합과 분리를 구현하기 위하여 1쌍의 Spring을 사용하고 있으며 양쪽 바퀴에 토크를 각각 전달할 수 있는 Slip mechanism 기능은 동일하다. 심지어는 구성부품의 총 수량까지도 동일하였다.

그러나 기동성, 조향성, 소음과 관련한 구조 및 요소설계와 외형 및 가공방법에서는 서로 다른 특성을 보이고 있는데 대표적인 차이점을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 The detail design of the existing NSD

항목	미국 NSD	러시아 NSD
외형		
기동성	사다리꼴 치형의 Center cam 채택	Involute 치형의 Center cam 채택
조향성	사각 치형(4개)의 holdout ring 채택	Involute 치형(16개)의 holdout ring 채택
소음	사다리꼴 치형의 Center cam에 의해 분리 및 결합하므로 Sharp한 접촉	Involute 치형의 Center cam에 의해 분리 및 결합하므로 Smooth한 접촉
가공방법	대부분의 부품이 절삭가공	대부분의 부품이 냉간 단조로 제작

2.2.3 NSD 기본설계

야지 차량용 NSD의 기본적인 설계는 군용 5톤 트럭의 차동기어 case에 그대로 장착되어 조립이 가능하도록 설계하였다.

또한 미국과 러시아 NSD의 장·단점과 특징 등을 비교분석한 자료를 바탕으로 성능개선이 가능하도록 전반적인 시스템과 규격을 결정하였으며, 이렇게 정리된 기본설계 사양의 조립도는 Fig. 3과 같다.⁵⁾

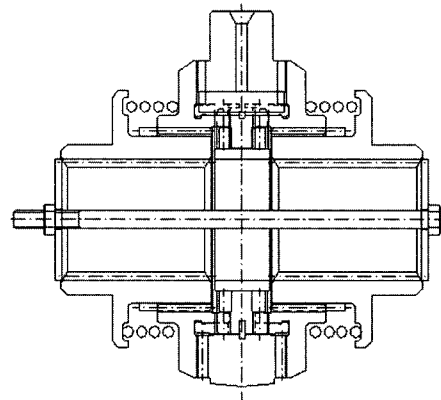


Fig. 3 Assembly drawing of NSD

2.3 Axiomatic Approach를 이용한 기존 설계 평가 및 개선 설계

2.3.1 공리적 접근을 이용한 설계평가 및 개선설계

기본설계 과정을 통해 선정된 NSD의 전반적인 시스템과 규격을 토대로 수요자의 요구기능을 충족할 수 있고, 선진 NSD보다 비교우위의 성능을 갖출 수 있도록 하기 위하여 공리적 접근을 이용한 설계 평가 및 개선설계 방법을 채용하였다.

공리적 접근법의 첫 번째 단계로 NSD에 대한 소비자의 요구조건(CAs)(1999년 민군 겸용기술사업의 연구개발과제로 선정당시 도출)을 선정하였으며, 다음 단계는 기 파악된 소비자의 요구조건(CAs)을 만족스럽게 구현하기 위한 기능적 요구사항(Functional requirements, FRs)을 설정하였다. NSD의 설계목표이기도 한 기능적 요구사항(FRs)을 독립의 공리에 의거 만족시킬 수 있는 요소 중 가장 영향을 많이 미치는 설계요소(Design parameters, DPs)를 설정하였다.^{6,9)}

이와 같이 설정된 설계요소를 통하여 기존의 선진 NSD를 평가한 결과 대부분 중복화 설계임이 확인되었다. Fig. 4에 기동성에 대한 설계행렬이 중복화 되었음을 보여주고 있다.

개선 설계방법으로는 첫째 요구기능(FRs)을 만족시키는 설계요소(DPs)의 집합이 탈중복화되도록 시스템을 재구성한다. Fig. 5에 이렇게 구성된 기동성에 대한 설계행렬을 보여주고 있다.

Number	Functional Requirements	기동시 RPM(최소)	기동시간(최소)	Center cam구동(비동구동)	인전함 Center cam	인전함 Spider	인전함 Clutch
2.1	Smooth한 구동	X	X	X	0	0	0
2.2		0	X	X	0	0	0
2.3	Smooth한 구동	0	0	X	0	0	0
2.4	일정한 Slip	0	0	0	X	0	0
2.5		0	0	0	X	X	0
2.6		0	0	0	X	X	X

Fig. 4 Coupled design matrix of mobility

Number	Functional Requirements	Center cam구동(비동구동)	기동시간(최소)	기동시 RPM(최소)	인전함 Center cam	인전함 Spider	인전함 Clutch
2.1	Smooth한 구동	X	0	0	0	0	0
2.2		X	X	0	0	0	0
2.3		X	X	X	0	0	0
2.4	일정한 Slip	0	0	0	X	0	0
2.5		0	0	0	X	X	0
2.6		0	0	0	X	X	X

Fig. 5 Decoupled design matrix of mobility after improving design

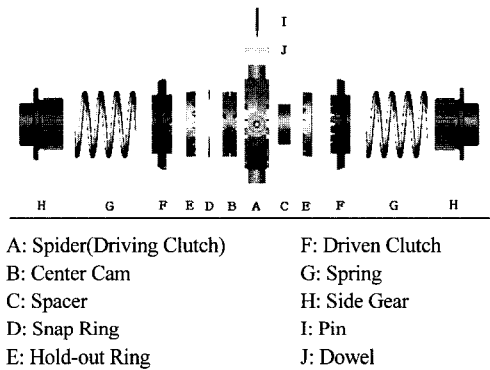


Fig. 6 Construction of NSD

두 번째는 설계요소에 가장 영향을 많이 미치고 있는 공정변수(PVs) 선정하는 것이다. 공정변수 분석을 통하여 많은 부품을 개선설계 하였으며, 대표적인 예로는 자동차가 회전 시 조향 특성을 향상시키기 위해서는 Holdout ring 부품의 잇 수가 Center cam 잇 수와 동일하게 하여 응답성도 높고 세밀한 차동제어가 이루어지게 한 것이다. 이러한 기존 설계에 대한 공리적 접근에 의한 설계평가와 이를 바탕으로 한 개선설계에 대한 세부 연구내용은 차기 논문에서 제시하고자 한다. 이러한 과정을 통해 개선 설계된 구성품은 Fig. 6과 같다.

2.3.2 최적화과정을 통한 세부설계

공리적 접근법을 이용하여 개선 설계된 시스템을 구성하고 있는 각종부품들의 구체적인 설계변수는 CAE Tool(COSMOS, APM WinMachine)을 활용하여 결정하였다.^{10,11)}

NSD의 정적안전성과 내구성에 중요한 역할을 하는 Clutch와 기동성 향상에 중요한 역할을 하고 있는 스프링의 최적설계변수를 선정하는 과정을 정리하면 다음과 같다.¹²⁾

엔진으로부터 전달된 동력은 트랜스미션을 거쳐 NSD의 핵심부품인 Clutch를 통하여 액슬에 전달하게 되는데, Clutch의 적용 특성상 반복하중을 받기 때문에 면압 강도와 굽힘 강도에 대한 정적안전계수와 피로안전계수를 적절히 선정하는 것이 무엇보다도 중요하다. Fig. 7에 액슬 샤프트가 체결되는 Clutch의 내부 스프라인 부를 벽 지지조건으로 완전 고정하고, Clutch 치부에 수직방향으로 압력(185.6 MPa)을 적용하는 FEM 해석결과를 보이고 있다. Clutch이 뿌리 부위 발생하는 최대굽힘응력(510 MPa)과 최대변형량(0.0039)을 이용한 정적안전계수와 피로안전계수는 선진NSD의 설계기준을 만족시킬 뿐 아니라 강성기준도 충분한 안전한 설계임을 확인할 수 있었다.¹³⁻¹⁵⁾

또한 스프링은 양쪽 바퀴의 회전 수 차가 발생할 경우 회전수가 빠른 쪽의 Clutch를 분리시켜 주며, 회전수가 같아질 경우 분리된 Clutch를 결합시켜주는 기동성을 결정하는 핵심 기능을 한다. 따라서 회전수차에 의하여 분리되기 위해서는 반경방향 힘이 다음 수식과 같이 커야하며,

$$F_{Spring} < F_{Radial}, F_{Spring} < |F_t (\cot \alpha - \mu)|$$

또한 용이한 결합을 위해 스프링 힘이 반경방향으로 작용하는 힘보다 다음과 같이 커야 한다.

$$f_{Spring} > f_{Radial}, f_{Spring} > f_t (\cot \alpha + \mu)$$

Fig. 8은 스프링의 최적설계 시 사용된 CAE설계 소프트웨어의 입력 화면으로서 5회 이상 입력 자료

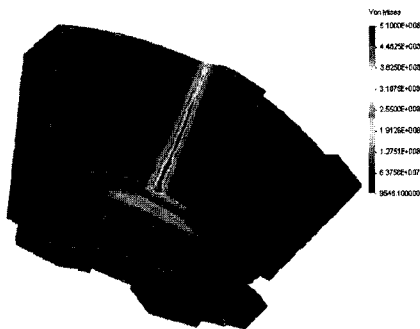


Fig. 7 Result of stress analysis of driven clutch

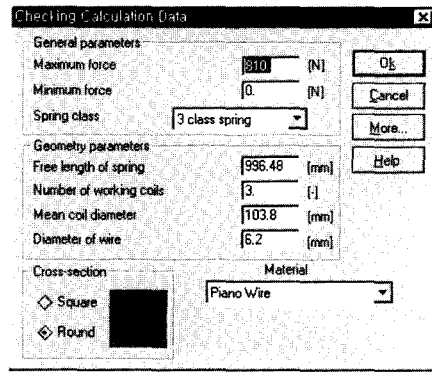


Fig. 8 Input data for spring design

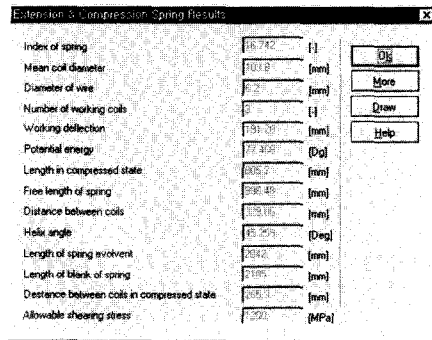


Fig. 9 Output data for spring design

를 조정하는 검증절차를 거쳤으며, Fig. 9에는 이렇게 선정된 최적설계변수가 출력 화면에 나타나 있다.

이렇게 설계된 스프링의 특성은 NSD 기동성을 결정하는 Clutch의 최적 탈착 시기를 결정하는 설계요소가 되었다.

2.4. 시제품제작 및 시험평가

2.4.1 야지 차량용 NSD 시제품 제작

개선 설계된 야지 차량용 NSD의 기능, 성능, 내구성시험 등 설계목표 달성여부를 평가하기 위해 시제품을 제작하였다. NSD의 주요부품인 Center cam과 조립된 시제품 형상은 Photo. 1과 같다.

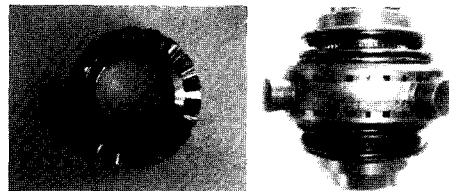


Photo. 1 The center cam and assembly of NSD

2.4.2 시험평가 방안개발 및 시험장치 선정

야지 차량용 NSD의 시험평가 방안 및 기준은 미국 및 한국 국방규격에도 규정되어 있지 않다. 또한 러시아나 미국의 공급업체에서도 장착방법과 작동 여부를 평가하는 방법을 제외하고는 시험평가 방안이나 기준을 제시하지 않고 있다.

그러므로 고유설계기술 확보의 핵심요소인 성능평가방안과 기준을 개발하기 위하여, 가용한 성능평가 방안 및 기준(MIL SPEC: 국방규격-2320-1007-4, '97. 12. 16)으로, 유사 부품의 성능평가 방안을 기본 자료로 사용하였다. 또한 개선설계 및 세부설계 과정에서 결정된 설계목표, 기능 및 설계기준을 확인할 수 있는 평가방안 및 기준을 개발하였다. 이렇게 개발된 평가방안 및 기준을 적용하기 위한 시험평가 장비 사양을 선정하여 선진국 전문 시험장비 업체에 제작의뢰 하였다. 그러나 NSD 시험장비의 공급기간이 너무 길어 NSD가 개발된 시점에는 활용할 수 없는 입장이었다. 그러므로 국내에서 가용한 장비를 우선적으로 개조하여 시험할 수 있도록 평가방안과 기준을 수정하여 시험을 실시하였다.¹⁶⁾

2.4.3 시험실시 및 시험결과

차축 및 변속장치 성능평가용으로 사용되고 있는 Dynamo-tester를 개조하여 시험평가를 실시하였다.

Photo. 2는 이렇게 개조된 장비에서 시험 평가하는 장면을 보여주고 있다.

NSD의 기본성능, 내구성 및 강성, 소음의 평가방안은 기존 군용트럭에 일반 차동장치를 부착 하여 차축의 성능을 평가하는 MIL SPEC 활용 시도출된 기준에 의거 실시하였고, 성능평가의 핵심요소인

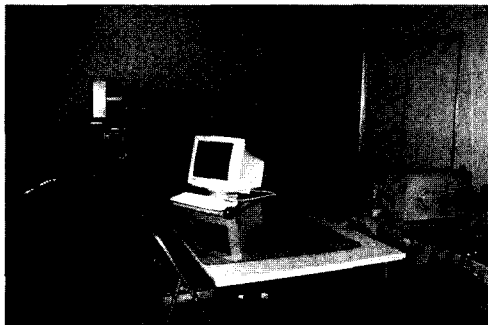


Photo. 2 Experimental device for performance of NSD

Table 3 The experimental result of NSD

평가항목	의미	시험결과
NSD기능	NSD의 분리 및 결합 기능(속도:MIL 2320-1007-4)	야지, 비포장 및 포장도로에서 NSD 기능정상
기동성	높지대에 빠졌을 때 자력으로 탈출능력	설계목표 달성 및 설계변수 확인
조향성	포장도로에서 코너링 기능	설계목표 달성 및 설계변수 확인
내구성 및 강성	6,500Km주행 후 비파검사 및 20,000cycle 비틀림 시험 후 균열검사 (MIL2320-1007-4)	6,762Km주행 및 35,531cycle시험 실시결과 균열 없음
소음	NSD분리 및 결합 시 소음측정	설계목표 달성 및 설계변수 확인

기동성 및 조향성은 새로 개발한 평가방안 및 기준에 따라 실시하였다. 이렇게 실시된 시험평가 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

개조한 시험장비와 수정한 성능평가 방안 및 기준의 적합성을 확인하기 위해 미국의 NSD도 동일한 조건으로 실시하였으며, 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 전량 수입에 의존하고 있는 NSD를 국산화하기 위하여 선진 NSD Sample을 입수 Reverse Engineering을 통한 NSD의 설계기준, 기능 및 각종특성을 파악하였고 특허자료를 분석하여 선진 NSD와 성능이 유사한 야지 차량용 NSD를 개발하였다.

- 1) NSD 개발과정을 통하여 확인된 효과적인 개선 설계프로세스는 향후 선진제품의 국산화 개발 및 고유설계기술 확보 시 활용할 수 있는 실용적인 지침이 될 것이다.
- 2) 공리적 접근을 이용한 기존설계의 평가 및 개선 설계를 실시하였으며, 요구기능을 구현하기 위한 설계변수 조정이 가능한 고유 설계기술을 확보하였다. 설계평가 및 개선설계과정에 대한 내용은 차기 논문에서 제시하고자 한다.
- 3) 설계목표 달성여부를 확인하기 위한 시험평가 방안 및 기준을 개발하였고, 적합한 장비사양도

결정하여 제작 주문하였다. 기존에 가용한 Dynamo-tester를 개조하고, 시험평가방안과 기준을 조정하여 시험평가를 실시한 결과 설계목표를 달성하였음을 확인하였다. 개조된 장비와 조정된 평가방안 및 기준의 적합성을 확인하기 위해 미국 NSD도 시험한 바 유사한 성능을 확인하였다. 시험평가방안 및 기준의 개발과정 및 시험과정 등에 대한 구체적인 내용은 차기 논문에서 제시하고자 한다.

- 4) 이렇게 야지 차량용 NSD가 국내에서 개발됨에 따라 선진 NSD 수입가격이 개발 전에 비해 43% 절감하게 되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 민군겸용기술사업 연구개발과제인 야지차량의 미끄럼 제한 차동장치 개발 연구결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) Y. C. Lee, Y. C. Kim, J. H. Park, J. T. Kim, "Research and Development about a Differential System for a Slip Limitation of an Off-road Vehicles," Ministry of Commerce, Industry and Energy, pp.42-43, 2002.
- 2) Y. C. Lee, "NSD Annual Project Report 2000," Dual Use Technology Center, pp.103-108, 2000.
- 3) Y. C. Lee, "NSD Annual Project Report 2002," Dual Use Technology Center, pp.383-388, 2002.
- 4) Europe Intellectual Property Office, <http://www.ep.espacent.com>
- 5) E. H. Kim, J. C. Lee, "Development of Toroidal Type Continuously Variable speed Transmission for Agricultural Tractor II," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.115-117, 2002.
- 6) N. P. Suh, The Principles of Design, Oxford Univ, Press, pp.64-72, 1990.
- 7) Y. R. Moon, S. W. Cha, P. Y. Yoon, "Weight Reduction in Automobile Design Through Axiomatic Approach," Transactions of KSAE, Vol.7, No.6, pp.106-109, 1999.
- 8) N. P. Suh, "Axiomatic Design of Mechanical Systems," ASME, Vol.117, pp.2-4, 1995.
- 9) Y. R. Moon, S. W. Cha, Y. K. Kim, "Axiomatic Approach for Design Appraisalment and Development DVD," Transactions of KSAE, Vol.16, No.5, pp.124-125, 1999.
- 10) COSMOS, <http://www.cosmos.com>
- 11) APM WinMachine, Designmecha, <http://www.designmecha.co.kr>
- 12) K. H. Suh, H. K. Min, I. B. Chyun, "Optimum Design of Front Toe Angle Using Design of Experiment and Dynamic Simulation for Evaluation of Handling Performances," Transactions of KSAE, Vol.8, No.2, pp.126-128, 2000.
- 13) B. S. Kim, M. W. Suh, "Topology Optimization using an Optimality Criteria Method," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.224-231, 1999.
- 14) Y. C. Park, D. P. Yun, S. C. Hue, D. B. Jin, B. J. Lee, "The Study of Safety Evolution of Improvement on LOWER ARM II," Transactions of KSAE, Vol.6, No.3, pp.19-20, 1999.
- 15) Y. S. Pyoun, K. B. Lee, "The Machine Design Use by CAE Software," Technology Information Co, pp.438, 2002.
- 16) E. H. Kim, J. C. Lee, "Development of Toroidal Type Continuously Variable speed Transmission for Agricultural Tractor I," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, pp.220-225, 2002.