https://doi.org/10.7735/ksmte.2025.34.2.120

Technical Papers

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

전기차용 드라이브 샤프트 조인트 고절각 상황에 대한 분석 - 사례 연구

김세은^a, 정창호^a, 이문구^a, 박정률^b, 한상원^b, 전용호^{a,*}

Analysis of High-angle Situations in Drive Shaft Joints for Electric Vehicles – A Case Study

Se-Eun Kim^a, Chang-Ho Jung^a, Moon-Gu Lee^a, Jung-Lyul Park^b, Sangwon Han^b, Yongho Jeon^{a,*}

^a Department of Mechanical Engineering, Ajou University ^b Seohan Inobillity

ARTICLE INFO

Article history:					
Received	21	March	2025		
Accepted	31	March	2025		
Keywords:					
Drive shaf	t				
Constant velocity Joint					
Finite element method					
Thermo-mechanical coupled analysis					

ABSTRACT

This study performs a thermomechanical analysis of an electric vehicle drive shaft under high-angle rotation using LS-DYNA and Ansys transient thermal analysis. It examines how 40° and 50° angular misalignments affect thermal and stress distributions at the contact interface. Results revealed that larger angles caused greater discrepancies from prior models. To improve accuracy, a segmented contact surface approach was used instead of the conventional average heat flux method, reducing simulation-experiment deviation by about 43%. However, the analysis did not include the rubber boot's thermal effect or fully account for dynamic changes in friction and material properties. Future work should integrate empirical data and advanced thermal modeling under various driving conditions to enhance predictive performance.

1. 서 론

최근 전기차 시장의 급속한 성장과 함께 친환경 차량의 설계 및 구동계 효율성 향상이 중요한 연구 주제로 부상하고 있다^[1-3]. 전기 차는 내연기관 차량에 비해 구동계 설계에 있어 더 높은 설계 자유 도와 효율성을 제공하지만, 동시에 모터에서 발생하는 높은 토크 와 급격한 동력 전달 특성으로 인해 드라이브 샤프트 및 그 조인트 부품의 내구성에 새로운 도전 과제를 제기하고 있다.

기존 연구에서는 주로 드라이브 샤프트의 낮은 절각 조인트를 기준으로 동력 전달 시 발생하는 응력과 마찰열을 분석하였다^[4,5]. 이러한 설계 접근은 제품의 개발 단계에서 부품 간 접촉 조건과 열전달 메커니즘을 확인함으로써 설계의 안정성 확보와 경제성 확 보에 장점이 있다. 그러나 최근 전기차 설계에서 내부 공간 최적화 및 전동화 시스템의 복합화 요구가 증가되고, 적용 차종이 트럭과 오프로드 차량과 같은 험지 운행이 필요한 차량으로 확대되면서, 더 높은 절각의 조인트 적용이 필요하게 되었다.

고절각 조인트는 드라이브 샤프트의 설계 및 배치에 있어 보다 유연한 자유도를 제공함으로써 엔진 또는 모터의 위치와 바퀴의 배치를 최적화하는 데 기여할 수 있다. 그러나, 이러한 고절각 조인 트는 기존 설계와는 다른 열·구조적 문제를 초래할 수 있다. 예를 들어, 40° 또는 50°와 같은 급격한 절각은 부품 간 비정상적인 응 력 집중을 유발하고, 접촉면에서의 비선형 마찰 특성 변화를 초래 하며, 급격한 열 발생 및 열 누적 현상을 야기할 가능성이 크다. 이러한 문제들은 드라이브 샤프트 조인트의 내구성 및 동적 안정 성에 중대한 영향을 미칠 수 있다⁽⁴⁾.

그럼에도 불구하고, 선행 연구들은 주로 낮은 절각 상황에서의

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-31-219-3652

E-mail address: princaps@ajou.ac.kr (Yongho Jeon).



Fig. 1 Experimental and simulation differences with regarding the angle

열·구조 연동 해석 및 기계적 안정성에 초점을 맞추고 있으며, 고 절각 조인트에 대한 실험적 검증이나 수치해석 사례는 확인할 수 없었다. 이에 따라 고절각 조인트를 적용한 전기차 드라이브 샤프 트 설계 기준이나 안전성 확보를 위한 기초 데이터가 제한적이며, 실제 차량 운행 중 발생할 수 있는 열·구조적 문제를 예측하기 위 한 모델 또한 미흡한 상황이다.

이러한 이유로 선행연구^[5,6]에서 해석적 방법을 적용하여 절각 에 따른 온도 상승을 예측하는 연구가 수행되었으며, LS-DYNA 와 Ansys Thermal을 연계하여 높은 해석 정확도를 확보하였다. 그러나 Fig. 1과 같이 실제 고절각 상황에서는 기존 연구 방법을 적용한 해석에서 고절각으로 진행할수록 더 높은 수치해석 오차 가 발생하는 하여 고절각에 맞춰 새로운 해석 방법에 대한 추가 연구가 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 40° 및 50°의 고절각 조인트에서 발생하는 열·구조적 거동을 보다 상세히 분석하고자 한다. 이를 위해, 고 절각 조인트에서 발생하는 비선형 접촉 및 응력 집중 현상을 정밀 하게 모델링하고, 마찰열 발생 및 열전달 특성을 수치 해석 기법과 실험적 데이터의 비교 분석을 통해 검증할 예정이다. 또한, 해석적 접근과 실험 데이터를 비교함으로써 예측 모델의 신뢰성을 높이고, 이를 바탕으로 고성능 전기차 드라이브 샤프트 설계에 대한 최적 화 방향성을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기존 해석 방법의 요약

선행 연구^[5,6]에서는 ANSYS Workbench를 활용하여 LS-Dyna/ ANSYS Transient Thermal 기반의 해석 환경을 구축하였다. ANSYS Workbench 통해 K-파일을 생성하여 해석 모델의 기하 학적 정보 및 물성치를 먼저 정의하고, LS-Dyna를 이용한 열-구 조 연성 해석을 진행하여 모델에 대한 변형, 응력, 속도를 분석하



Fig. 2 Schematic of simulation model



Fig. 3 Schematic of shaft angle differences

였다. 이후 LS-Dyna에서 도출된 단시간의 입열 데이터를 Ansys Transient Thermal 모델에 적용하여 장기적인 열 거동을 해석하 였다.

이러한 해석 과정에서 두 프로그램 간 동일한 mesh를 공유하도 록 설계하여 데이터 매핑이 원활하게 이루어질 수 있도록 하였으 며, 이를 통해 복잡한 열-구조 연성 문제를 효율적으로 분석할 수 있었다.

2.2 유한요소 해석 모델 구성

본 연구에서도 상기 2.1절에서 언급한 방법과 같이 유한요소해 석을 진행하였으나, 특이점이 발생한 상황을 보고하고 그 문제점 을 극복한 내용에 대하여 상세 기술을 진행하고자 한다. 본 연구에 사용된 모델은 Fig. 2와 같다. 각 부품들은 Outer Race 내부의 Groove를 따라 고절각 상황에서 회전 운동 시 접촉이 일어날 수 있도록 구성되어 있다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 Shaft와 중심 축간의 각도가 각각 40°와 50°에 대한 해석 연구와 결과를 비교하고자 한다. 두 모델에 서의 주요 차이점은 Fig. 3에서 표시된 바와 같이 Shaft의 각도

Property	Value	Unit
Density	7.85	g/cm ³
Young's modulus	205	GPa
Yield stress	785	MPa
Poisson's ratio	0.29	
Thermal expansion coefficient (0~100°C)	12.2	µm/m℃
Thermal conductivity (100°C)	42.6	W/mK

Table 1 AISI 4140 material properties

Table 2 Contact area friction coefficients

Property	Value	Unit	
Dynamic friction coefficient	0.1		
Static friction coefficient	0.06		
I.::4:-1 4	25 (40°)	Ŷ	
initial temperature	26 (50°)	C	
Initial angular velocity	200	RPM	
Torque	700	Nm	
Time	120 (40°)	S	
	100 (50°)		

변화에 따라 주요 열 발생 위치인 Inner/Outer Race 내의 Groove 와 Ball의 접촉 부위, 그리고 Ball과 Sleeve Cage 내부의 접촉 부위에서의 차이가 발생하게 된다.

유한 요소 해석에 사용된 재료는 AISI 4140으로 실제 부품에 사용된 재료이며, Table 1에 기본 물성을 정리하였다.

본 연구에서 사용된 모델의 구성 요소들은 서로 접촉하며 상대 적인 운동을 수행하므로 부품의 구동을 시뮬레이션하고 해석적 계 산을 수행하기 위해서는 부품 간의 접촉 모델을 적절하게 설정하 는 것이 필수적이다. Ls-Dyna 해석에 적용된 접촉 조건은 부품 간 마찰과 열 발생을 고려하기 위해 Surface-to-Surface 조건을 적용하였고, 이를 통해 각 요소의 표면을 기준으로 인접한 노드, 엣지, 및 요소 표면을 탐지하여 접촉 여부와 반발력을 계산할 수 있다. 이러한 접촉 해석을 기반으로 마찰력, 열 발생, 그리고 열전 달 현상을 분석할 수 있으며, 본 연구에서는 내부 윤활을 고려하여 Table 2에 제시된 마찰 조건과 해석에 사용된 실제 실험과 동일한 초기 조건을 정리하였다.

2.3 동적 해석 결과 및 분석

선행 연구^[5,6]와 동일하게 LS-Dyna를 이용한 Explicit 해석을 진행하기 위해 상기 Table 2에 언급된 기본 조건으로 해석을 수행 하였다. 시험기에 장착된 샘플이 1회전하는 데 걸리는 시간은 0.12 초이며 3회전 동안 해석을 수행하여 계산된 결과를 바탕으로 열 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 소프트웨어는 LS-Dyna와 LS-Prepost 2024 R1(4.11.0)이며, Ryzen 9 5950x-16 Core CPU와





128 GB의 RAM을 활용하여 약 20시간의 해석 시간이 소요되었 다. 합당한 해석 연구의 결과를 확인하기 실험에 설정된 하중 조건 인 700 Nm 토크에 의해 발생한 응력이 각 부품에 어떻게 전달되 는지를 평가하였다. Fig. 4는 Ball과 Sleeve Cage에서 관찰된 응 력 분포를 보여준다. 분석 결과, Sleeve Cage에 가해진 최대 응력 은 40°의 경우 약 660 MPa과 50°의 경우 약 850 MPa로나타났다. 이중 50° 절각의 경우에는 AISI 4140 소재 강도의 파단 강도와 유사하며, 실제 시험 시편 평가에서도 50°의 경우 120초의 계획된 실험 시간을 충족시키지 못하고 100초 회전 후 파손이 발생하여 실험이 중단되었다. 이는 해석적으로 관련 내용을 잘 검증한 것으 로 판단할 수 있다.

동적해석의 주요 목적은 내부 구성 요소 간 마찰로 인해 발생하 는 열유속의 계산으로 이를 정량화 하기 위해 주요 부품 간 마찰에 의해 생성된 열유속 값을 도출하였다. 본 연구에서 중점적으로 분석한 부품은 Inner Race, Balls, Sleeve Cage, Outer Race이며, 각 부품별 열 유속 값을 개별적으로 도출하였다. 도출된 열유속값 을 통해 부품간 접촉이 발생하는 표면 노드 값을 활용하여 평균

Parts	Heat flux (w/m ²)				
	Inner race	Ball	Cage	Outer race	
А	4990	6300	18600	5800	
В	4630	6510	4800	6100	
С	5900	5800	5100	6400	
D	6200	6100	4730	5800	
Е	6200	5940	4320	4800	
F	5700	5900	4800	4770	
G	4900	6200	4200	5300	
Н	5320	6300	4600	5120	
Ι			4300		
J			16800		

Table 3 Calculated heat flux (40° case, 3 rotation)

Table 4 Calculated heat flux (50° case, 3 rotation)

Dorto	Heat flux (w/m ²)			
Faits	Inner race	Ball	Cage	Outer race
А	7800	7100	19600	5800
В	7790	6510	7550	6350
С	7740	6510	7140	6210
D	7300	6100	8500	6200
Е	6200	5940	7300	6200
F	4900	5900	7200	6310
G	6600	6200	7100	6120
Н	6970	6300	6990	5980
Ι			6700	
J			18750	

열 유속을 계산하였다. 본 해석에서 고려된 접촉 표면은 Fig. 5에 표시하였으며, 각각의 열 유속 값은 Table 3과 4에 정리되어 있다. 검증 실험의 환경을 반영하여 경계 조건을 외부 노출 면의 대류

열전달로 설정하였다. 표면의 대류 열전달 계수는 15 W/m²℃로 가정하였으며, 이는 검증 실험을 챔버 내부에서 수행함에 따라 주 변 공기는 정지 상태이며 자연 대류에 의한 열전달만 발생하는 조 건을 가정하였다.

Table 4가 완성되기 전 기존 Table 3을 구성할 때와 같이 접촉 이 발생된 표면 노드 전체 값의 평균을 적용하면 Table 4보다 낮은 열유속 값들이 도출되어 최종 열해석 결과와 실험값의 오차가 15% 수준으로 상대적으로 신뢰도가 낮은 해석 결과가 도출되었 다. 이러한 문제가 발생하게 된 원인으로는 Fig. 6과 같이 절각이 높아 짐에 따라 실제 접촉이 발생되는 부위가 축소되는 현상이 발 생하였고, 그에 따라 초기 해석 조건으로 제시된 3회전 만으로는 회전 시 각 부품에 걸리는 하중과 이에 따른 부품간 마찰에 의해 발생되는 열유속이 안정 상태에 이르기 전에 해석이 종료되었으며, 초기 조건에서 마찰이 발생하는 지점까지 접촉되는 노드에서 형성



Fig. 6 Example of heat flux calculation separation on Sleeve cage

되는 급격한 하중과 열유속의 변화 현상에 대해 과소 예측을 하게 된 것으로 분석된다. 또한, 작은 접촉면적에 매우 높은 하중이 부가 되어 접촉이 일어나는 부위에는 매우 높은 열유속이 발생하게 되 나, 주변의 고무 부트와 윤활제와 같이 열전도를 지연시키는 인자 에 대한 해석 모델이 정확히 구현되지 않아 온도 상승률이 상대적 으로 과소하게 계산된 것으로 분석되었다. 따라서, 현 단계에서 빠 르게 대응할 수 있도록 각도가 증가함에 따라 열유속을 추출하는 부위에 대한 세밀화가 필요하다고 판단하였다. 본 연구에서는 아 래의 Fig. 6과 같이 각 부품의 중심에서 접촉하는 면의 절각 방향 으로 상/하단 절개를 하여 열 유속의 추출 노드를 분리하고 각 노드 값을 평균화하여 계산한 후 합하는 형태로 해석을 수행하여 발생 된 오차율을 개선하고자 하였다.

2.4 열해석 결과 및 분석

도출된 열유속을 기반으로 ANSYS Transient Thermal을 이용 한 열 해석을 수행하여 장시간 작동에 따른 온도 축적을 예측하였 다. 실제 실험 환경에서 Ball은 Inner Race와 Outer Race의 Groove를 따라 지속적으로 왕복하며, Ball의 이탈을 방지하기 위 한 Sleeve Cage 표면과도 지속적으로 마찰하여 열이 발생하고 전달된다. 이러한 현상에 대한 정확한 해석을 위해 동역학 해석을 계속적으로 수행하기에는 많은 시간과 비용이 소모되므로 선행연 구^[6]에서 진행한 바와 같이 접촉면 전체가 균일하게 가열이 이루 어진다는 가정을 바탕으로 열해석을 수행하였다.

해석 결과는 아래 Fig. 7에 정리하였다. Fig. 7은 50° 절각 상황 에서 100초간 구동한 후의 온도 분포 상황을 나타낸다. 앞서 언급 한 바와 같이 50° 절각의 경우 실험 중 과도한 하중으로 인해 파손 이 발생하여 비교를 위한 실험 결과를 100초까지 도출하여 해석 또한 동일한 시간까지 진행하였다.

해석 결과, 마찰로 인한 열전달의 영향으로 Sleeve Cage 영역이 가장 높은 온도를 유지하는 것을 다시 한번 확인할 수 있었으며, 구조상 하중에 가장 취약한 Sleeve Cage 설계가 고절각 상황에서 더욱 중요하다고 판단할 수 있다.



Fig. 7 Temperature simulation results (50° case, 100s)

Course	Temperature (°C)			
Source	40°	50° (old)	50° (new)	
Simulation (a)	63.5	62.4	67.5	
Thermal cam (b)	63.2	73.8		
Laser sensor (c)	59.8	73.1		
Error (a to c, %)	6.18	14.66	8.29	

Table 5 Experimental validation

2.5 해석 결과의 검증

해석 결과값의 검증을 위해 선행 연구^[6]에서 사용된 실험장비를 활용하여 열화상 카메라와 레이저 온도 센서에 대한 결과를 측정 하고 Table 5에 정리하였다.

Table 5에서 보는 바와 같이 열유속의 추출 부위를 보다 정교 하게 수정함에 따라 오차율은 급격하게 감소하는 경향을 확인하 였으며, 이에 따라 선행 연구에서 제시되었던 전체 접촉 부품에 대한 평균 열유속 값의 활용 대비 오차율 약 43%의 개선을 확인 하였다.

3. 결 론

3.1 연구 요약 및 결론

본 연구에서는 LS-Dyna와 ANSYS Transient Thermal을 활용 하여 고절각 회전 운동을 수행하는 부품의 열-구조 연성 해석을 수행하였으며, 기존 연구에서 보고되지 않은 특정 특이점을 분석 하고 해결하는 방법을 제시하였다. 특히, Shaft와 중심 축의 각도 변화(40° 및 50°)가 접촉 부위의 열 및 응력 분포에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

해석 결과, 절각이 증가함에 따라 접촉 부위가 축소되면서 높은 국부 응력이 발생하는 현상이 관찰되었으며, 50° 절각의 경우 Sleeve Cage에 작용하는 응력이 AISI 4140 강의 파단 강도에 근 접하여 실험적으로도 파손이 발생함을 확인하였다. 또한, 마찰로 인한 열유속이 부품별로 차등적으로 분포하며, 특히 Sleeve Cage 부위에서 가장 높은 온도가 유지됨을 알 수 있었다.

기존 연구에서는 접촉 표면 전체의 평균 열유속을 적용하는 방 식으로 해석을 수행하였으나, 본 연구에서는 접촉 영역을 세밀하 게 구분하여 열유속을 추출하는 방안을 도입하였다. 이를 통해 해 석 결과와 실험 결과 간의 오차율을 약 43% 감소시켜 보다 신뢰성 높은 해석 모델을 구축할 수 있었다.

본 연구의 결과는 고절각 회전 시스템에서의 열-구조 연성 해석 을 정교하게 수행하기 위한 방법론을 제시하였으며, 실험과의 비 교를 통해 해석 모델의 정확성을 검증하였다. 향후 연구에서는 고 무 부트부(Rubber Boot) 및 윤활 조건을 고려한 추가적인 해석과 실험적 검증을 진행하여, 극한 조건에서의 드라이브 샤프트 부품 설계 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

3.2 연구의 한계 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 LS-DYNA와 Ansys Mechanical을 연계하여 등 속 조인트의 발열 특성을 분석하였으나, 몇 가지 개선이 필요한 한계점이 존재한다. 먼저, 고무 부트의 열전달 및 차폐 효과를 모델 링에 포함하지 않아 실제 주행 환경과의 차이가 발생할 가능성이 있다. 또한, 마찰계수 및 재료 물성값은 실험 데이터를 기반으로 설정하였으나, 다양한 주행 조건(속도, 하중 등)에 따른 동적 변화 를 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다.

온도 비교는 Outer Race의 노출된 표면을 중심으로 이루어졌으 며, 조인트 내부의 열 분포를 직접 측정하는 것이 어려워 추가적인 실험적 검증 방법이 요구된다. 보다 정밀한 분석을 위해 비접촉식 온도 측정 기법을 도입하는 것이 필요하며, 향후 연구에서는 다양 한 실험 조건에 대한 영향도를 확인하고, 실험 조건에 보다 정합하 는 모델을 적용하여 해석의 신뢰성을 높이는 방향으로 연구를 확 장할 예정이다.

후 기

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (No.20020730).

References

 Horváth, K., Zelei, A., 2024, Simulating Noise, Vibration, and Harshness Advances in Electric Vehicle Powertrains: Strategies and Challenges, World Electr. Veh. J., 15:8 367, https://doi.org/10.3390/wevj15080367.

- [2] Ling, C., Wang, L., Kan, C.-D., Yang, C., 2024, Thermal– Electrical–Mechanical Coupled Finite Element Models for Battery Electric Vehicle, Machines, 12:9 596, https://doi.org/ 10.3390/machines12090596.
- [3] Anggara, H. D., 2024, Revitalizing Vehicle Innovation: Exploring Electric Car Chassis Structures through Finite Element Analysis, Innovation in Engineering, 1:1 50-59, https://doi.org/ 10.58712/ie.v1i1.6.
- [4] Lee, H., Jeong, J. Y., Cho, H., Oh, B., 2021, Analysis of Contact Force and Plastic Deformation of Parts in C.V. Joint for Passenger Car Using Quasi-static Analysis, Transactions of KSAE, 29:5 485-492, https://doi.org/10.7467/KSAE.2021.29.5.485.
- [5] Kim, S.-E., Jung, C.-H., Lee, M.-G., Han, S., Park, J.-L., Jeon, Y., 2024, Thermal Structure Coupled Analysis for Electric Vehicle Drive Shaft, Torque-Transmission Joint, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 23:11 33-39, https://doi.org/10.14775 /ksmpe.2024.23.11.033.
- [6] Kim, S.-E., Jung, C.-H., Lee, M.-G., Han, S., Park, J.-L., Jeon, Y. 2024, Thermo-Mechanical Coupled Analysis of Electric Vehicle Drive Shafts, Appl. Sci., 14:24 11768, https://doi.org /10.3390/app142411768.



Se-Eun Kim

Ph. D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University.Her research interest is FEM Analysis.E-mail: tpzi08@ajou.ac.kr

Postdoctoral Researcher in Department of

Mechanical Engineering, Ajou University.



His research interest is Metal 3D Printing with FEM Analysis.

Chang-Ho Jung

E-mail: did9594@ajou.ac.kr



Moon-Gu Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include Design and Control of High Precision Positioning Systems. E-mail: moongulee@ajou.ac.kr



Jung-Lyul Park

Leader in Driveline R&D Center, Seohan Innobility. His research interest is Design, Test and Development of Driveline. E-mail: jipark@seohan.com



Sangwon Han Researcher in Seohan Inobillity. His research interest is Testing and Validation. E-mail: swhan@seohan.com

Yongho Jeon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest s include Additive Manufacturing, Welding. E-mail: princaps@ajou.ac.kr