

산업용 지게차의 구동부에 대한 소음/진동 저감 방안에 대한 연구

A Study on Reduction of Noise and Vibration for Driving System of An Industrial Forklift

정진태† · 홍일화* · 김우형**

Jintai Chung, Ilhwa Hong and Woohyung Kim

Key Words : forklift(지게차), gear(기어), axle(기어축), bearing(베어링), housing(기어박스)

ABSTRACT

A noise/vibration of the forklift happens in the driving axle to charge the drive and are examined closely by an each reason. After this study consider a reduction method of a noise/vibration about the gear, axle, bearing and others, the purpose of this study is to reduce a noise/vibration for a stability of the total system. From the data to be measured through an experimental method, the problems of the gear, axle, bearing, housing and others are examined closely, and the forklift is derived the model to be the engineering. The Mechanism of the problem occurrence is examined through a palametric research about an each influence factor. Lastly, the results of this study propose the model to be improved.

기 호 설 명

N_1 = Drivng Gear 잇수, N_2 = Driven Gear 잇수
 N_3 = Sun Gear 잇수, N_4 = Planetary Gear 잇수
 N_5 = Ring Gear 잇수, G1 = Drivng Gear
 G2 = Driven Gear, G3 = Sun Gear
 G4 = Planetary Gear, G5 = Ring Gear
 ω = 회전성분(Hz)

1. 서 론

현재 지게차는 산업의 발달로 인하여 물류를 운송하는 수단으로서 그 수요가 증가하고 있다. 이전의 지게차는 주로 실외에서 사용되며 엔진을 구동하기 때문에 지게차가 주행했을 때의 소음은 관심의 대상이 되지 않았다. 하지만, 근래에는 대형 할인마트와 대형 물류 창고가 생겨나면서 주로 실내에서 많은 작업을 수행하면서 엔진 구동 방식에서 모터와 감속기를 이용한 전동식 지게차 등장하게 되었고 주행

중의 지게차에서 발생하는 소음이 주 관심사로 부각되고 있다. 이러한 이유로 인하여 산업체에서는 저소음 지게차를 개발하기 위한 노력을 활발히 진행하고 있다. 이러한 성능 향상을 위해 선진국에서는 저소음 지게차를 설계하기 위하여 지게차의 소음에 영향을 미치는 인자를 파악하고 이를 설계단계에서부터 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 저소음 지게차에 대한 기초기술이 부족한 국내에서는 이에 대한 본격적인 연구가 실행되고 있지 않고 있다.

지게차 구동축의 소음 및 진동의 주요 발생 원인은 기어, 축, 베어링으로 구성된 내부 동력전달계의 요소품의 형상, 관성, 강성, 감쇠, 마찰, 가공공차, 조립공차 등으로 매우 다양하다. 특히 기어, 축, 베어링으로 구성된 회전체 시스템에서 기어는 기계장치의 핵심부품으로 동력을 전달하는 중요한 역할을 하지만 소음을 발생시키는 역작용을 한다. 기어 소음인 화인소음(whine noise)은 순음(pure tone)에 가깝고 높은 음압을 가지며 인간의 귀에 가장 예민한 주파수 대역에 있는 주파수 성분을 갖기 때문에, 화인소음의 저감은 지게차의 정숙성 향상을 위하여 필수적이다.

본 연구는 실험적 측면에서 지게차 구동축의 소음원을 규명하고 이를 저감하기 위한 대책을 강구할 수 있는 기술이 정립하는 것이다. 지게차 구동축의 소음을 규명하기 위한 다양한 실험적 절차와 방법을 체계화 하고, 측정 데이터를 분석하여 소음 발생 메커니즘을 규명하고 결론을 도출하는 일련의 과정에 대한 이해와 접근 기술을 정립하고자 한다.

† 책임저자, 한양대학교 기계공학과
 E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
 Tel : (031) 400-5287 Fax : (031) 501-4590

* 한양대학교 기계공학과 대학원

** 한양대학교 기계공학과 대학원

2. 산업용 지게차

2.1 지게차 구동부

대상체의 구동부는 산업용 전동식 지게차에 많이 쓰이는 드라이브 모터와 감속기로 이루어진 구조를 가지고 있다. 모터를 구동시켜 감속기가 감속하여 속도를 토크로 바꾸어 주는 시스템이다. 드라이브 모터는 3상 교류 시스템을 사용하고 있고, 감속기는 헬리컬 치차를 이용한 1 단 감속부와 유성치차를 사용한 2 단 감속부로 이루어져 있다.[그림. 1]

2.2 GMF(Gear Mesh Frequency) 및 감속비

대상 지게차의 감속기는 2 단 감속 구조로 구성되어 있다. 외부 입력부로부터 1 단 감속부를 구동시킨 후 중심축에 의하여 2 단 감속부를 시킨후 출력축을 회전시킨다. 대상체의 구동부에 해당하는 감속기 구성 요소 각각의 회전속도와 GMF는 다음과 같은 이론식에서 나온다.[표. 1]

a) Driven Gear Speed(S_2)

$$S_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times \omega$$

b) Sun Gear Speed(S_3)

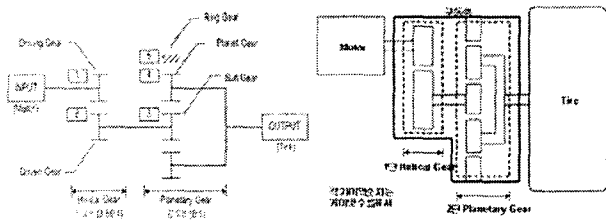
$$S_2 = S_3$$

c) Carrier Speed(S_c)

$$S_c = \frac{S_3 + \left(\frac{N_5}{N_3} \right) S_5}{1 + \frac{N_5}{N_3}}$$

d) Planetary Gear Speed(S_4)

$$S_4 = \left(1 - \frac{N_5}{N_4} \right) S_c + \left(\frac{N_5}{N_4} \right) S_5$$



[그림. 1] 구동부 감속기의 구성기어 명칭과 개략도

[표. 1] 구동부 감속기의 축회전속도와 GMF

	1단 감속부		2단 감속부			Carrier
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	
축회전속도	ω	0.28ω	0.28ω	0.075ω	-	0.047ω
GMF	27ω	27ω	3.047ω	3.047ω	3.047ω	-
감속비	3.56:1		6:1			

3. 소음 진동 측정 실험

3.1 측정 장비

- FFT: Pulse Multi Analyzer (B&K)
- Accelerometer: Type 4383 (B&K)
- Mictophone: Type 4190 (B&K)
- Signal Recoder: TEAC LX-10
- Soud Level Meter: System 824 (Larson)
- Impact Hammer: Type 8202 (B&K)

3.2 구동 실험

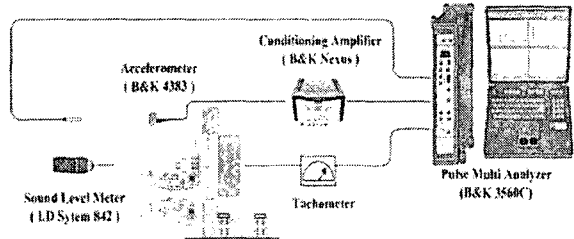
구동부를 구성하는 구동 모터와 감속기를 연결한 후, 정격부하를 장착하는 것으로 실험 조건을 선정하였다. 모터와 감속기의 주파수 신호 채집을 위하여 각각의 상단과 반경방향으로 가속도계를 부착하여 진동을 측정하고 전방 1m 앞에 소음계 및 마이크로폰을 설치하여 음압 및 소음신호를 채집하였다.

모터는 정격 회전수가 4500rpm, 용량 3KW 를 사용하였고 문제시 되는 영역인 1000rpm 부터 200rpm 씩 속도를 증가시키면서 신호를 채집하였다.

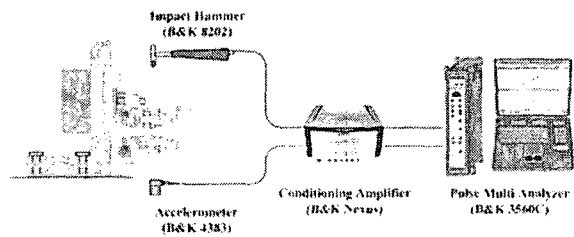
3.3 Impact Test

모터와 감속기의 고유진동수를 파악하기 위하여 각각의 구성품에 대해 등간격으로 격자를 표시하고 표시된 지점에 충격을 가한 후 그 응답에 대한 신호를 채집하였다.

감속기의 경우 내부 구성품에 대한 중요 부품별 실험과 외부 Housing에 대하여 실험으로 나누어 수행하였다.



[그림. 3] 단품실험 측정 장치도



[그림. 4] Impact Test 장치도

4. FEM을 통한 구조 해석

4.1 감속기 Housing 모델링

국내에서 제작하여 적용되고 있는 감속기를 바탕으로 상용 프로그램인 Catia를 이용하여 감속기 Housing의 형상을 Housing부와 Housing Cover부로 나누어 모델링하였다.

Young's Modulus는 자료 조사를 통하여 감속기 재질의 물성치 180GPa, Poisson's Ratio는 0.3, 밀도는 7860kg/m³을 사용하였다. 적용한 물성치와 모델링된 감속기는 시뮬레이션을 위해 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 이용하여 파일을 Import시켰다.[그림. 5]

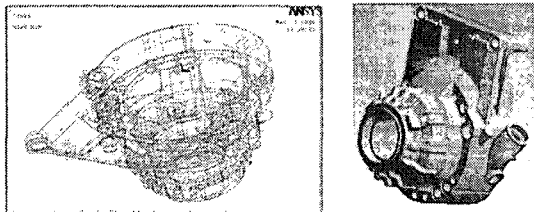
4.2 상용 프로그램을 사용한 모드 해석

해석시 사용한 물성치는 재질의 밀도를 이용하여 무게를 구하고 강성값은 철의 일반적인 수치를 사용하였다. 지지 조건은 Impact Test실험의 결과와 비교해 보기 위하여 Free-Free조건을 주었다. 이 결과값들의 비교는 시뮬레이션 결과값에 대한 정확성과 신뢰성을 주고 개선책 도출을 위한 기반이 될 것이다. Element Mesh는 관심이 되는 주요 영역은 Solid92의 Mapped Mesh를 사용하였고 그 밖에 영역은 Free Mesh를 사용하였다.

모드해석 결과 [표. 2]와 같은 감속기 부품에서 내장품을 제외한 하우징의 모드별 고유진동수를 추출할 수 있었다.

[표. 2] Housing의 모드별 고유진동수 [Simulation]

Mode	Natural Frequency
1	1631 Hz
2	2165 Hz
3	3302 Hz
4	3475 Hz



[그림. 5] Housing and Housing Assembled Model

5. 측정 결과 및 대책

5.1 소음/진동원 규명

1) 구동부 Frequency & GMF를 이용한 주파수 분석 [그림. 6]과 [그림. 7]는 구동부의 진동 신호와 소음 신호에 관하여 Waterfall Plot을 나타낸 것이다.

3개의 회전 성분이 보이고 있는데 27ω 성분은 위에서 언

급한 [표. 1]의 1 단 감속부의 회전배수성분을 나타낸 것이고, 1 단 감속부의 2X 성분과 만나 공진 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 27ω 성분과 그 회전 성분은 감속기에서 나타나는 주요 소음/진동원임을 알 수 있다.

38ω 성분은 위의 결과를 토대로 구동부의 주요 구성품 중 하나인 모터에서 발생하는 회전배수성분이라고 짐작할 수 있다. [그림. 8]을 통하여 38ω 성분은 확실히 모터에서 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 주파수 분석을 토대로 공진 현상에 의해 문제시 되는 영역을 다음과 같이 나타낼 수 있다.[표. 3]

2) Impact Test 결과 분석

결과값은 FRF(Frequency Response Function)을 통하여 확인할 수 있다. 실험시 나눈 격자점으로부터 채집된 신호를 중복시켜 Housing의 전반적인 고유진동수 분포를 이용하면 [표. 4]과 같이 고유진동수를 추출할 수 있다. 구동 모터 또한 같은 분석법을 사용하여 고유진동수를 추출하였다. 하지만 모터부의 진동량과 소음량은 시스템의 전체적인 크기만을 놓고 비교하였을 때 많은 문제점을 보이고 있지 않으므로 원인을 구동부의 감속기에만 국한시키기로 한다.

앞 절에서 시뮬레이션한 결과[표. 2]와 Impact Test 결과값 [표. 4]를 비교하여 보면 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 값이 차이를 보이고 있는 이유는 시뮬레이션에서 적용한 물성치 값이 실제값과는 차이가 있기 때문으로 보인다. 이 비교값들을 토대로 시뮬레이션의 결과값들이 상당히 신빙성이 있고 정확성이 있음을 확인할 수 있었다.

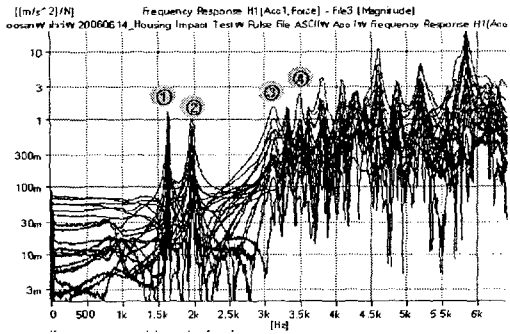
또한, 주파수 분석시 추출한 주요 공진 대역이 감속기 Housing의 고유진동수와 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 감속기를 구성하는 내부 동력 전달계의 요소품이 동력전달시 가진력을 발생시켜 Housing의 고유진동수와 만나 공진을 발생시키고 있다는 것을 알아낼 수 있었다. 즉, 감속기에서 진동과 소음을 발생시키는 27ω와 2배수 성분인 54ω와 Housing의 고유 진동수가 만나 공진을 일으킨다는 것이다. 결론적으로 감속기의 Housing이 동력전달시 발생하는 진동과 소음을 증폭시키는 소음/진동 매커니즘을 갖는다.

[표. 3] 구동부의 주요 공진 영역

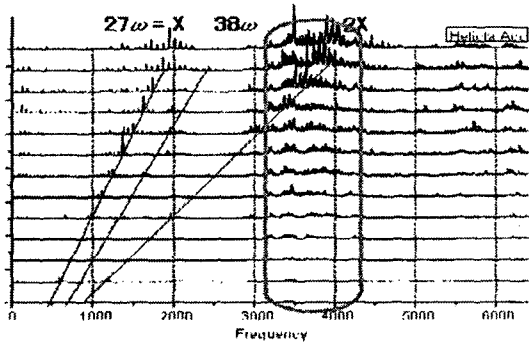
	1단 치차	구동 모터	1단 치차 조화성분
주파수대역	1400~1600	1800~1900	3400~3500

[표. 4] Housing의 모드별 고유진동수 [Impact Test]

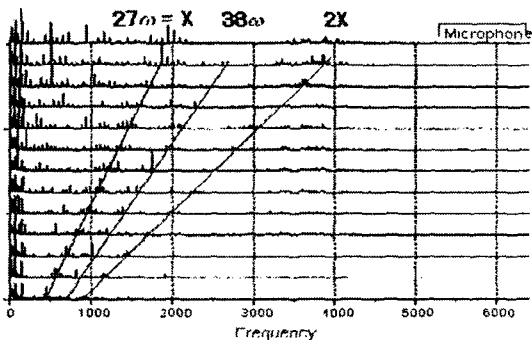
Mode	Natural Frequency
1	1626 Hz
2	1953 Hz
3	3310 Hz
4	3583 Hz



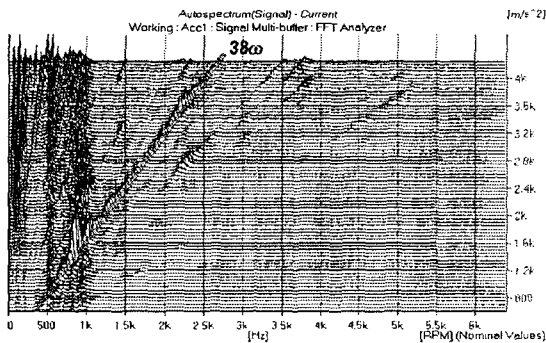
[그림. 6] Housing Part of Impact Test FRF



[그림. 6] 구동부의 진동 신호 Waterfall Plot



[그림. 7] 구동부의 소음 신호 Waterfall Plot



[그림. 8] 모터의 진동 신호 Waterfall Plot

5.2 시뮬레이션을 통한 개선안

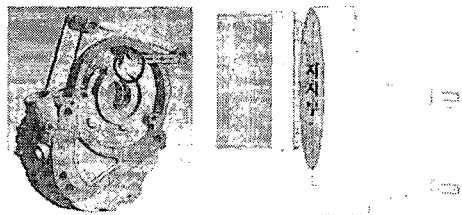
규명된 원인과 결과 분석을 기반으로 시뮬레이션을 통해 소음/진동을 저감할 수 있는 개선안을 제시할 수 있다. Impact Test 결과와 시뮬레이션 결과값의 비교를 통해 물성치를 보간하고 지게차 감속기 Housing부의 실제 적용 조건으로 지지조건[그림. 9]을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

결과치를 분석하여 보면 [그림. 9]에 표시되어 있는 Hosing Cover 중앙 부분 지지부의 구조를 중심으로 변형이 되는 것을 확인할 수 있었다.[그림. 10] 결과는 [표. 5]와 같다. 이것은 Hosing Cover 중앙 부분 지지부가 구조적으로 취약하여 변형을 일으키고 이로 인하여 소음/진동이 증폭됨을 알 수 있었다.

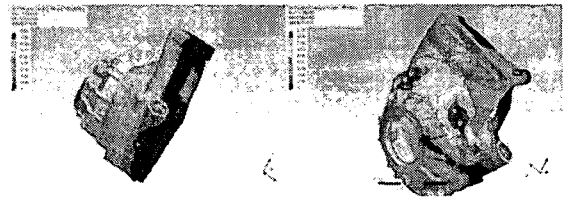
해결책으로는 구조적으로 접근하여 지지부의 강성 보강이나 형상 변형을 통하여 개선하는 방법이 있다. 그래서 제조 가격 및 방열을 고려하여 진동과 소음을 극대로 저감시킬 수 있는 효율적인 구조는 [그림. 11]과 같이 지지부의 두께 및 너비를 증가시키는 것이 시뮬레이션 결과 만족할 만한 개선치를 얻을 수 있었다. 또한, 고유진동수 대역도 각 모드별로 150~200 Hz정도 이동된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 감속기의 Housing부의 고유진동수가 공진 대역에서 회피되었음을 의미하기에 지게차 구동부 시스템 전체 진동과 소음을 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

[표. 5] 모드별 고유진동수와 모드형상[Simulation]

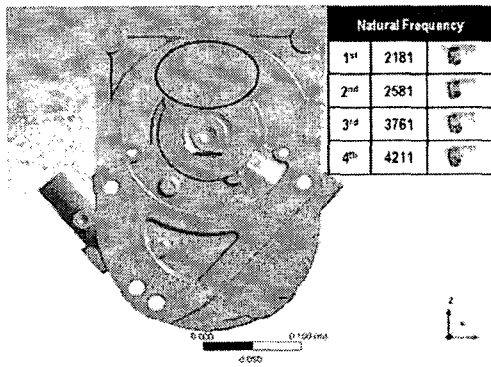
Mode	Natural Frequency	모드 형상
1	1959 Hz	지지부 길이 방향 변형
2	2364 Hz	원통 형상 변형
3	3501 Hz	원통 형상 변형
4	3907 Hz	지지부 길이 방향 변형



[그림. 9] 시뮬레이션시 지지조건(Clamped-Free)



[그림. 10] Typical mode shape at 1959 Hz, 3501 Hz



[그림. 11] 개선된 감속기의 Simulation 결과

6. 결 론

본 연구를 통하여 지게차 구동부에서 소음과 진동을 발생시키는 구성품들에 대하여 진동과 소음 특성을 분석하였으며, 그 구성품중 하나인 감속기의 특성이 가장 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. Waterfall Plot과 FRF을 살펴보면 관찰된 주요 진동수 대역은 1400~1600 Hz, 1800~1900 Hz, 3400~3500Hz 이었는데, 이것들은 감속기의 1단 감속부, 모터, 감속기의 2단 감속부에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

소음/진동 증폭 매커니즘은 감속기의 내부 동력전달 요소품(기어, 축, 베어링)이 가진력을 발생시켜 감속기 외곽에 위치한 Housing부와 만나 공진을 일으켜 전체적으로 그 크기량이 증폭되는 것이다.

지게차 구동부의 소음과 진동을 저감시키기 위해서는

첫째, 구동부를 구성하는 주요 구성품인 감속기에서 소음과 진동을 증폭시키는 역할을 하는 감속기 Housing부의 구조 개선을 통하여 억제시키는 방법이 있다.

둘째, 감속기의 감속부에서 발생하는 GMF값을 변경하는 것이다. 즉, 기어의 잇수나 전위비를 변경하여 기어 가진 주파수를 변경하는 것이다. 이 연구에서는 감속기 단품의 소음 진동특성의 특성을 통하여 분석해 보았다. 그래서 결론적으로 문제시 되고 있는 1 단 감속부와 2 단 감속부의 특성을 변경할 필요가 있음을 알 수 있었다.

하지만, 감속기는 실제 지게차에 장착되므로 장착실험 및 주행실험을 통하여 비교할 필요가 있다. 또한, 개선된 감속기의 검증을 위해서는 실제로 개선 감속기를 제작하여 본 연구에서 언급한 실험과 분석을 바탕으로 확인하여야 할 것이다. 이는 추가적으로 수행할 예정이다.

추가적으로 진동과 소음을 더욱 저감시키기 위해서는 38 ω 성분이 발생하는 구동 모터에 대한 개선이 필요할 것으로 보인다.

지게차의 구동부를 이루고 있는 감속기와 구동모터의 단품 특성 및 Impact Test 그리고 주파수분석을 통하여 지게

차 구동부의 소음/진동 특성에 대하여 깊이 있는 접근을 할 수 있었다. 또한, 이 특성들의 분석을 통하여 국내에서 개발 중인 지게차의 제작을 위한 중요한 자료를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) J. Derek Smith, 2003, "Gear Noise and Vibration", Marcel Dekker, Inc.
- (2) James I. Taylor, 2000, "The Gear Analysis Handbook", VCI.
- (3) P. Jo" nsson, Ö. Johansson, 2004, "Prediction of vehicle discomfort from transient vibrations", Journal of Sound and Vibration 282 (2005) 1043-1064.
- (4) 최연선 등. 1994, "기어구동에 의한 화인진동해석", 대한기계학회논문집 제 18권, 제 12호, pp.3246~3252
- (5) 김원현, 주원호, "일체형 동력전달계를 가진 지게차의 진동 특성 규명 및 저감", 한국소음진동공학회2004년도 추계학술대회논문집, pp.912~918
- (6) 정태형, 명재형, "2 단 치차계의 진동해석 시스템 개발에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제 7권, 제 1호, pp.284~294