

하이브리드 굴삭기 동력전달계 주요부품의 신뢰성 평가기술 개발

박종원, 정동수, 김형의 | 한국기계연구원

[요약문]

하이브리드 굴삭기는 에너지 재생 및 연비향상을 위하여 기존의 유압부품들 중 일부를 전기부품으로 대체하여 시스템을 구성하고 있다. 따라서, 하이브리드 굴삭기의 신뢰성을 평가하고 보장하기 위해서는 기계적인 부하와 전기적인 부하가 복합적으로 영향을 미쳐 발생하는 고장모드를 고려하여 신뢰성평가기법을 개발하여야 한다. 특히 하이브리드 굴삭기는 가혹한 실외 환경조건에서 운용되므로 새롭게 개발되는 부품들에 대하여 설계 결함을 조기에 발견하기 위한 복합 내환경 시험과 초가속 수명시험이 수행되어야만 한다. 본 연구에서는 FMEA, FMECA, FTA 및 HALT 등의 다양한 신뢰성 기법을 사용하여 하이브리드 굴삭기의 신뢰성평가기법을 개발하였고, 개발대상 하이브리드 굴삭기의 주요 동력전달 파트인 선회구동 시스템에 대한 신뢰성평가장비를 개발하고 구축하였다. 본 연구에서 개발된 하이브리드 굴삭기 신뢰성평가기법은 하이브리드 자동차의 부품들에 대한 신뢰성평가에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

하이브리드 굴삭기의 신뢰성평가기술은 하이브리드 굴삭기의 핵심부품과 하이브리드 시스템의 신뢰성을 기존 엔진 굴삭기와 대등한 수준으로 확보하기 위하여 개발대상 시제품의 종합성능, 내환경성, 안전성 및 수명을 평가하는 기술로서 시스템에 대한 신뢰도 할당과 가속수명시험 및 가상 수명예측 기술을 핵심으로 하는 하이브리드 굴삭기 개발을 위한 원천기술이다.

외국의 경우 하이브리드 건설기계의 프로토타입 제품 생산 및 양산 준비가 보고되고 있으나 국내의 경우 개발 검토 초기단계로 아직까지 하이브리드 건설기계를 대상으로 신뢰성평가기술에 대한 체계적이고 일반화된 방법론은 제시되어 있지 않다.

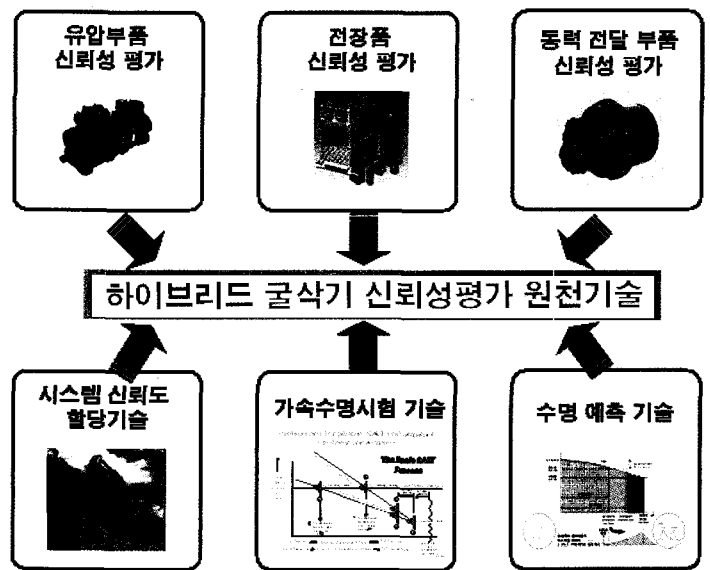


그림 1. 하이브리드 굴삭기 신뢰성 평가기술의 정의



하이브리드 굴삭기는 기존 굴삭기에 비해서 전기부품이 상대적으로 많이 적용되어 고객들로 하여금 제품의 품질 문제에 대한 의문을 가지게 할 수 있고 이는 하이브리드 굴삭기의 시장 진입을 가로막는 가장 큰 장애물로 인식되고 있다.

또한 건설중장비 고객은 매우 보수적이기 때문에 하이브리드 굴삭기의 핵심 성공요인은 일차적으로 신뢰성으로 판단되어 하이브리드 굴삭기의 핵심 부품 및 시스템에 대한 신뢰성 평가기술은 하이브리드 굴삭기의 개발에 있어서 필수적인 기술이라 할 수 있다.

2. 가속수명시험모델 개발

하이브리드 굴삭기 핵심부품들의 신뢰성을 제한된 시간내에 기존 굴삭기용 부품들과 동등한 수준에 도달하였는지 평가하기 위해서는 가속수명시험방법의 개발 및 적용이 요구된다. 이에 실사용 조건보다 가혹한 조건(가속 조건)에서 수명시험하여 고장을 촉진시키고, 가속 조건에서 관측된 데이터로부터 수명-스트레스 관계를 추정하고, 이를 사용 조건으로 외삽(Extrapolation)하여 사용 조건에서의 수명을 빨리 추정하기 위한 가속수명시험모델을 핵심부품 및 하이브리드 동력전달시스템에 대하여 개발하였다.

일반적으로 신뢰성 목표가 정해지면 무고장 시험시간의 계산은 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

무고장 시험은 시험대상 시료가 신뢰성목표를만족하는 시험시간까지 고장 없이 작동하여야 목표한 신뢰성을 보장하는 것으로 개발기간이 제한되어 있는 경우에는 시험시간의 제약으로 시험시간의 단축을 위하여 가속수명모델을 개발하고 가속계수를 산출하여 시험시간을 단축하게 된다. 이때 복합하중인자에 대한 가속모델의 가속계수 계산에는 식(2)와 같다.

$$AF = \left(\frac{V_{test}}{V_{field}} \right)^m \cdot \exp \left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right) \quad (2)$$

식(2)에서 산출된 가속계수를 이용하여 가속수명시험 시간의 계산은 식(3)에 따른다.

$$t_{nr} = \frac{t_n}{AF} \quad (3)$$

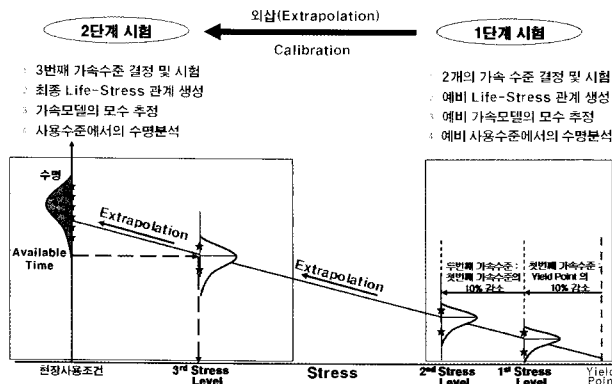


그림 2. 가속수명 시험계획 수립

2.1 엔진보조 전동기 가속수명시험모델 개발

엔진보조 전동기의 필드고장 데이터 및 문헌조사를 통하여, 수명 분포 및 모수를 추정된 결과 엔진보조 전동기의 수명은 Weibull 분포를 따르고, 형태모수는 1.2임을 확인하였다.

엔진보조 전동기의 주 고장모드인 열감자와 열화의 가속수명시험을 위해 가속인자는 전압과 온도를 선정하고, 가속모델은 전압과 온도를 포함한 복합모형을 선택하여 가속수명시험 시간을 계산한 결과 865시간임을 확인하였다.

엔진보조 전동기의 신뢰성 평가의 합격기준은 발체시료 3개를 865시간까지 가속수명 시험한 후, 3개 모두 고장이 없고 종합성능의 평가기준을 만족하면, 신뢰수준 80%에서 작동시간 8,000시간(B_{10} 수명)을 보장하는 것으로 하였다.

2.2 Hybrid Control Unit 가속수명시험모델 개발

HCU의 고장모드 분석결과에 의하면 HCU 케이블 및 I/C 부품 등의 열화에 의한 이상신호 입력 및 데이터 오류로써 전기부품(electro-mechanical parts)에 대한 Weibull 수명분포와 등가로 볼 수 있으므로 형상모수(B) 1.1을 적용하였다.

HCU의 주 고장모드인 케이블 및 부품 열화의 가속 수명 시험을 위해 가속 인자는 전압과 온도를 선정하고, 가속 모델은 전압과 온도를 포함한 복합 모형을 선택하여 가속수명시험 시간을 계산한 결과 510시간임을 확인하였다.

HCU의 신뢰성 평가의 합격기준은 발체 시료 3개를 510시간까지 가속수명 시험한 후, 3개 모두 고장이 없고 종합 성능의 평가 기준을 만족하면, 신뢰 수준 80%에서 작동시간 5,000시간(B_{10} 수명)을 보장하는 것으로 하였다.

2.3 붐 에너지 회생용 유압 펌프 · 모터 가속수명시험모델 개발

붐 에너지 회생용 유압 펌프 · 모터의 고장모드 분석에 의하면 주고장 모드는 피스톤과 슈 그리고 실린더 배럴의 마모에 의한 누유발생으로써 기계류 부품의 마모현상과 등가함으로 형상모수(B) 3.0을 적용하였다.

붐 에너지 회생용 유압 펌프 · 모터의 주 고장모드인 피스톤과 슈 그리고 실린더 배럴 마모의 가속 수명 시험을 위해 가속 인자는 압력과 유압유의 온도를 선정하고, 가속모델은 압력과 유압유의 온도를 포함한 복합 모형을 선택하여 가속수명시험 시간을 계산한 결과 570시간임을 확인하였다.

붐 에너지 회생용 유압 펌프 · 모터의 신뢰성 평가의 합격기준은 발체시료 3개를 570시간까지 가속수명 시험한 후, 3개 모두 고장이 없고 종합성능의 평가기준을 만족하면 신뢰수준 80%에서 작동시간 5,000시간(B_{10} 수명)을 보장하는 것으로 하였다.

3. 핵심부품 가속수명시험

2장에서 전술한 엔진보조 전동기, HCU 및 붐에너지 회생용 유압펌프 · 모터 이외에 선회전동기 및 감속기와 전력 변환기 및 Ultra Capacitor에 대한 가속시험모델 개발을 통한 시험조건설계 결과를 표 1에 나타내었다.



표 1. 하이브리드 굴삭기 핵심부품의 가속수명시험 조건

부품명	가속시험 조건	보증수명
선회 전동기	- 가속계수 : 35.9 - 전압가속지수 : 5	신뢰수준 80%에서 작동시간 8,000시간(B10)보장
선회 감속기	- 가속계수 : 16.664 - Power Index : 10/3 - 가속수명 시험시간 : 826시간	신뢰수준 80%에서 작동시간 8,000시간(B10)보장
전력 변환기	- 가속계수 : 43.13 - 전압가속지수 : 5 - 가속수명 시험시간 : 510시간	신뢰수준 80%에서 작동시간 5,000시간(B10)보장
Ultra Capacitor	- 가속계수 : 20.64 - 전압가속지수 : 1 - 활성화 에너지(eV) : 0.54 - 가속수명 시험시간 : 1234시간	신뢰수준 80%에서 작동시간 8,000시간(B10)보장
엔진보조 전동기	- 가속계수 : 35.9 - 전압가속지수 : 5 - 활성화 에너지(eV) : 0.6 - 가속수명 시험시간 : 865시간	신뢰수준 80%에서 작동시간 8,000시간(B10)보장
Hybrid Control Unit	- 가속계수 : 43.13 - 전압가속지수 : 5 - 활성화 에너지(eV) : 0.6 - 가속수명 시험시간 : 510시간	신뢰수준 80%에서 작동시간 5,000시간(B10)보장
봄에너지 회생용 유압 펌프 · 모터	- 가속계수 : 15.11 - 압력가속지수 : 8 - 가속수명 시험시간 : 570시간	신뢰수준 80%에서 작동시간 5,000시간(B10)보장

4. 하이브리드 동력전달 시스템 고장모드 분석 및 신뢰성 평가기준 개발

4.1 하이브리드 동력전달 시스템 고장 모드 분석

하이브리드 동력전달 시스템의 신뢰성 평가에 앞서, 제품의 고장 영향과 고장모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인하여야 한다. 이는 제품 설계, 제작, 조립 시스템 장착 운용 등에서 제품의 불완전으로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성 요소의 고장 형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계 개선으로 연결시키기 위한 중요한 부분이다. 이를 위한 주요 고장 모드 분석 기법으로는 FMMA,

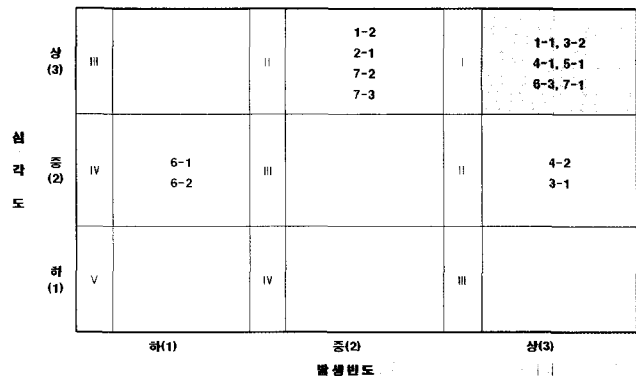
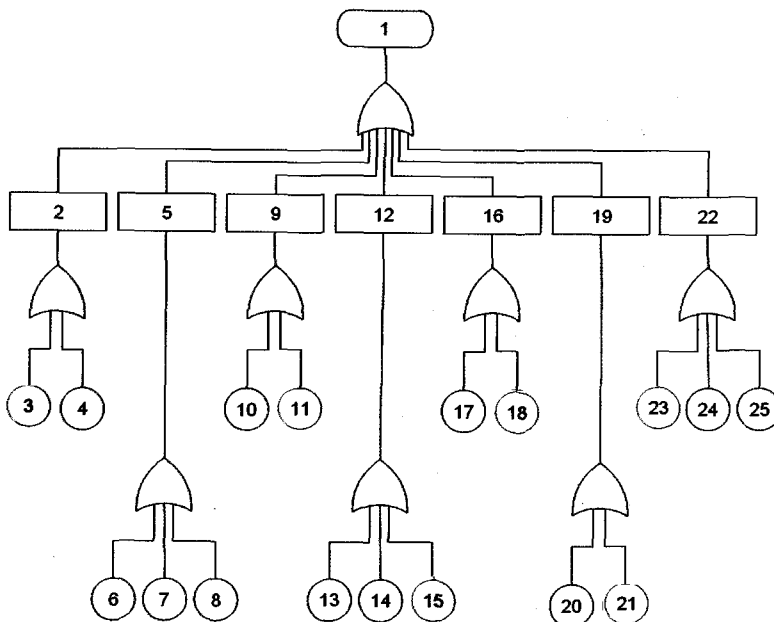


그림 3. 치명도 매트릭스 분석(Criticality Matrix Analysis : CMA)

FTA, FMECA, QFD 등을 활용하였다.

표 2. 고장모드 및 메커니즘 분석(Failure Modes and Mechanisms Analysis : FMMA)

주요 구성품 (primary components)	기능 (function)	고장모드 (failure modes)	고장 메커니즘 (failure mechanisms)	
선회전동기 (베어링)	축 지지, 원활한 회전	스폴링	1-1	마모
		변형	1-2	부식, 피로
선회감속기 (Seal)	하우징 내부오일 밀봉	누유	2-1	고속, 흡집
엔진보조 전동기 (오일 Seal)	내부 오염 및 누유 방지	마모	3-1	마찰력 증가
		열화, 손상	3-2	누유
Inverter/Converter (인버터부)	가변주파수 AC 전원으로 전압, 전류, 주파수를 조정	커패시터 소손	4-1	효율 저하
		누전	4-2	오동작
Ultra Capacitor(Bolt)	체결용	파손	5-1	기계적 강도 취약
HCU (케이블 조립체)	전원공급 및 각 유니트 간 통신 데이터 입출력	케이블 단선	6-1	작동불능
		케이블 피복손상	6-2	누전
		케이블 열화	6-3	입출력 데이터오류
봄 에너지 회생용 유압 펌프 · 모터 (피스톤 & 슈)	압력 및 유량을 공급받아 회전력 발생, 실린더 배럴부와 sealing	누설발생	7-1	Scratch
		마찰증가	7-2	오리피스 막힘, 온도변화
		슈 파손	7-3	고체 접촉



1. 하이브리드 동력전달 시스템 고장
2. 선회전동기
3. 베어링 마모 및 변형
4. 리볼버 파손 및 변형
5. 선회감속기
6. 가어 손상
7. 동력 전달 저하
8. 하우징 파손 및 누유
9. 엔진보조 전동기
10. 베어링 마모 및 변형
11. 오일실 마모 및 누유
12. Inverter/Converter
13. 인버터부 커패시터 소손 및 누전
14. 평행회로부 커패시터 소손 및 누전
15. 인버터부 커패시터 소손 및 누전
16. Ultra Capacitor
17. Steel Case 침수 및 파손
18. Bolt 파손
19. Hybrid Control Unit
20. 컨트롤 유니트 접속 불량 및 열화
21. 케이블 조립체 열화 및 파손
22. 봄 에너지 회생용 유압 펌프 · 모터
23. 피스톤 및 슈 고장
24. 실린더 배럴 고장
25. Seal 파손

그림 4. 결함 나무 분석(Fault Tree Analysis : FTA)



고장 모드	선회전동기 (메이킹)		선회감속기 (Seal)	엔진보조 전동기 (오일 Seal)		I/C (인버터부)	UC (Bolt)	HCU (케이블 조립체)	플 에너지 회생용 유압 펌프·모터 (피스톤 & 슈)		
	마모	변형	누유	마모	누유	커패시터 소손, 누전	파손	단선 손실 열화	마찰 증가	누설, 압력저하	피스톤 마모 및 슈 파손
역기전력 상수	○	○		●	●						
코깅 토크	●	●		●	▲						
초과회전 속도			○						○	●	○
전 효율			○			○			○	○	○
소음	○	○		▲	○	▲					
온도 상승				▲	○			○	●	○	●
속도 제어						○					
효율 유지						○					
기계적 충격						▲	○	●			
유전 손실률							●				
동력 분배 제어								○			
고온	●	▲	○	○	○	○	▲	●	●	○	●
초과 압력									○	●	○
기동 토크									○	▲	○
수명	○	○	○	●	○	○	●	●	○	●	○
중요도 점수	46	44	38	23	37	25	13	25	42	47	

가장중요 : ○ (5), 중요 : ● (3), 보통 : ▲ (1)

그림 5. 품질 기능 전개 단계 I(Quality Function Deployment Level I)

4.2 하이브리드 동력전달 시스템 신뢰성평가기술 개발

하이브리드 동력전달시스템은 개발대상 굴삭기시스템 중 기존의 유압모터가 전동기로 대체된 선회구동부 시스템을 의미하는 것으로써, 하이브리드 동력전달 시스템의 신뢰성을 평가하는 방법으로는 종합성능 시험, 내환경성 시험, 안전성 시험, 수명 시험 등이 있으나 이와 같은 신뢰성 시험을 독립적으로 수행한 규격은 국내 및 국제적으로도

표 3. 하이브리드 동력전달 시스템 신뢰성 시험항목

분류	시험항목	시험항목 수
종합성능 시험	역기전력 상수 시험	6
	코깅 토크 시험	
	소음 시험	
	효율 시험	
	기동 토크 시험	
	온도 상승 시험	
내환경성 시험	기계적 충격 시험	5
	저온 시험	
	고온 시험	
	습도 시험	
	방수 시험	
안전성 시험	내압 시험	3
	초과 회전 속도 시험	
	초과 압력 시험	
수명 시험	수명 시험	1
총 시험항목 수		15

미흡하고 더욱이 신뢰성 관련 구격은 전문한 실정이기 때문에 각 핵심부품별 신뢰성평가기준을 먼저 개발한 후 시스템수준에서의 고장모드분석 결과에 기반하여 하이브리드 동력전달 시스템의 신뢰성 평가기준을 개발하였다. 개발된 신뢰성평가기준에 대한 시험항목을 표 3에 나타내었다.

5. 하이브리드 동력전달 시스템 신뢰성 평가장비 개발

하이브리드 동력전달시스템에 대한 신뢰성 평가장비를 그림 6과 같이 개발하였고, 주요 작동부의 유압회로도를 그림 7에 나타내었다. 개발된 시험장비의 수명시험시 시료부의 선회전동기는 속도제어를 하게되며 부하부의 유압모터는 비례 압력제어밸브(그림 7의 ①)에 의하여 설정된 부하만큼 시료부의 전동기에 부하 토크가 가해지도록 작동하게 된다.

부하용 유압모터의 작동시 캐비테이션의 방지를 위하여 작동유 충전용 펌프(그림 7의 ③)에서 유량을 계속 보충하여 주며 이때의 충전압력은 릴리프밸브(그림 7의 ②)에 의해서 조절되게 된다.

수명시험시의 등가 부하토크는 비례 압력제어밸브(그림 7의 ①)에 의하여 가변 될 수 있고, 시료부의 선회전동기는 토크제어가 아닌 속도제어만을 하게 되며, 부하부의 유압모터는 설정압력에 의한 토크 즉, 부하제어만을 수행하게 된다.

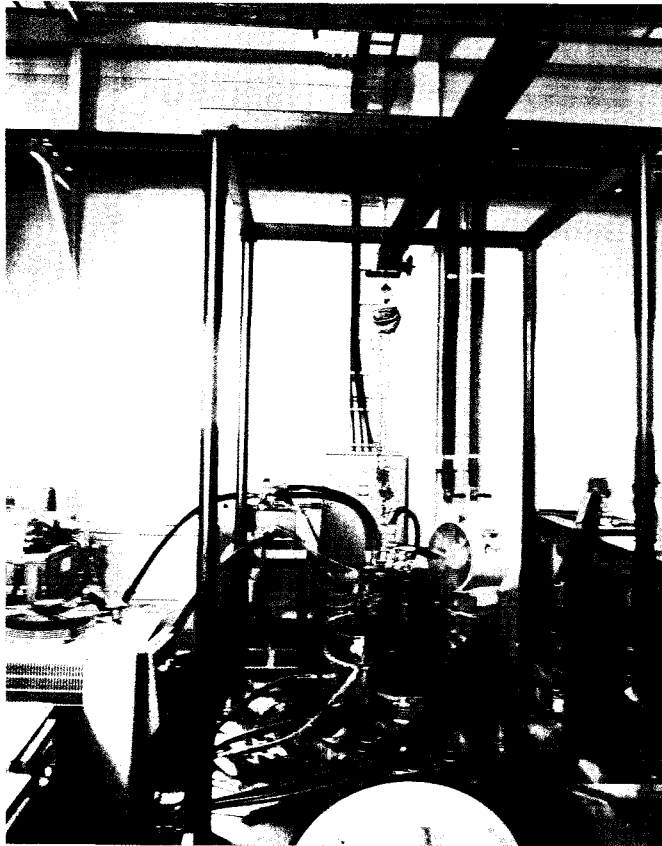


그림 6. 하이브리드 동력전달 시스템 신뢰성 평가장비

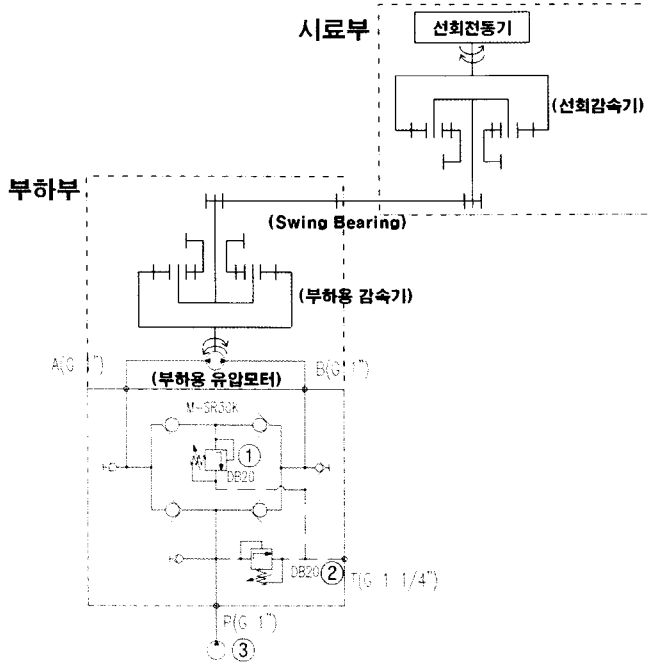


그림 7. 하이브리드 동력전달 시스템 유압 회로도

6. 하이브리드 동력전달 시스템 가속시험모델

기존 유압식 굴삭기의 Duty Cycle과 동등한 신뢰성 목표를 달성하는 것은 하이브리드 굴삭기 개발과제의 최종목표이며, 1단계에서는 하이브리드 동력전달시스템의 신뢰성목표를 신뢰수준 80%로 B10 5,000시간을 보장하는 것으로 하였다. 또한 4장에서 수행한 하이브리드 동력전달시스템의 고장모드 분석에 의하면 핵심동력전달부품인 엔진 보조 전동기 및 선회전동기와 선회감속기의 주고장 모드는 온도와 부하 하중으로써 이들 핵심부품의 수명은 Weibull 분포를 따르고, 형태모수는 최대한 보수적인 관점에서 전동기 수명분포의 형태모수 값인 1.2를 적용하였다.

하이브리드 동력전달 시스템의 고장모드 분석에 의하면 핵심 동력전달 부품인 엔진보조 전동기 및 선회전동기와 선회감속기의 주고장 모드는 온도와 부하 하중으로써 이에 대한 가속수명시험을 위해 가속인자는 전동기의 냉각수 온도와 선회감속기의 부하하중을 선정하고, 가속모델은 냉각수 온도와 감속기의 부하하중을 포함한 복합 모형을 선택하여 가속계수를 산출하고 가속수명시험 시간을 계산한 결과 420시간으로 설정 하였다.

따라서 하이브리드 동력전달 시스템의 신뢰성 평가 합격기준은 발체 시스템 3세트를 420시간까지 가속수명 시험한 후, 3세트 모두 고장이 없고 종합성능의 평가기준을 만족하면, 신뢰 수준 80%에서 작동시간5,000시간(B10 수명)을 보장하는 것으로 하였다.

7. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 굴삭기의 핵심부품들과 동력전달 시스템에 대하여 신뢰성평가기술을 개발하기 위하여 FMMA, FMECA, FTA, QFD 등의 기법을 활용한 고장모드 분석을 수행하였고, 이는 Field에서 발생할 수 있는 고장

및 문제 상황을 미연에 방지하도록 Fail safe 기능 개발 등에 응용가능할 것으로 사료된다.

또한 개발기간과 비용을 절감하고 효율적인 신뢰성평가를 수행하기 위하여 핵심부품에 대한 가속수명모델과 시험조건을 개발하였다.

전술한 과정들을 통하여 개발된 하이브리드 굴삭기용 핵심부품들에 대한 현장 작동조건에서의 성능 및 수명을 검증할 수 있는 신뢰성 평가기준과 신뢰성 평가장비는 향후 기술개발 결과의 상용화와 하이브리드 자동차용 부품들의 신뢰성평가에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

❁ 참고 문헌

- [1] Dimitri Kececioglu, Ph.D.,P.E., 1993, Reliability and Life Testing handbook, Vol. 1, Prentice Hall PTR, New Jersey, pp. 1~104.
- [2] Tyrone L. Jones, 2007, Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Naval Surface Warfare Center, West Bethesda, pp. 14-1~22-14.
- [3] C.W.G Verhoeve, C.F.A Frumau., 1997, Reliability Testing of Ac-module Inverters, European Photovoltaic Solar Energy Conference
- [4] Ed Sawyer, Ted Von Kampen., 2008, Reliability Consideration Inverters/DC Link Capacitor Using PP Film and 105°C Engine Coolant, IMAPS.
- [5] Li, Y., Billington, S., Zhang, C., Kurfess, T., Danyluk, S., and Liang, S., 1999, "Dynamic Prognostic Prediction of Defect Propagation on Rolling Element Bearings," Trans. Journal of Tribology, 42, No. 2, pp. 385~392.
- [6] Jones, A. B., 1960, "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings Under Arbitrary Load and Speed Conditions," Trans. of ASME., 82, pp. 309~320.
- [7] Filetti, E. G., and Rumbarger, J. H., 1970, "A General Method for Predicting the Influence of Structural Support Upon Rolling Bearing Performance," Trans. of ASME., 921, pp. 121~128.



박 종 원

· 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
선임연구원
· 관심분야 : 건설기계 산업, 유·공압 기기,
시스템신뢰성
· E-mail : jwpark@kimm.re.kr



정 동 수

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원
· 관심분야 : 건설기계/농기계, 신뢰성평가
· E-mail : jds667@kimm.re.kr



김 형 의

· 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
책임연구원
· 관심분야 : 건설기계 산업, 유·공압 기기,
시스템신뢰성
· E-mail : khe660@kimm.re.kr