

ACPF 핫셀 크레인의 운영 건전성 향상을 위한 시스템 개선안 고찰

유승남*, 이종광

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*snyu@kaeri.re.kr

1. 서론

한국원자력연구원에서는 사용후핵연료의 효율적 관리와 연구를 위하여 사용후핵연료 관리공정 실증 시설(ACPF, Advanced spent fuel Conditioning Process Facility)을 아르곤셀 기반으로 개량하여 운영하고 있다[1]. 특히, 핫셀 내부에는 공정장치 및 공정물질 등을 취급하기 위한 천장형 인셀 크레인(In-cell crane)이 설치되어 있다. 해당 크레인 시스템의 경우, 현장 설치 이전에 산업안전관리공단을 통해 동작 성능 및 구조적 변형 여부 등에 대한 검사를 받았으며, 현장 설치 후에는 각종 기능 및 정격하중에 대한 부하시험을 검사원 입회하에 수행한 바 있다. 하지만 시스템 운영 및 반복적인 부하 시험을 수행하는 과정에서, 초기 설계 시에는 파악하지 못한 개선 요구 사항들이 도출되었다. 이와 관련하여 본 논문에서는 ACPF 크레인 시스템의 장기적 운영 건전성 향상의 관점에서 크레인의 구동부 및 제어부에 대해 최근 수행하고 있는 몇 가지 주요한 분석내용들을 제시하고자 한다.

2. ACPF 인셀 크레인 제어부 분석

2.1 ACPF 인셀 크레인 기본 사양 및 특징

ACPF 인셀 크레인의 최대 인양용량은 1톤, Span은 1,800 mm, 거더(Girder)의 최대 폭은 910 mm, 최대 인양높이는 3.4 m이다(핫셀 내 작업대의 높이 900 mm를 감안하면 실제 유효 인양높이는 2.5 m임). 또한, 향후 유지보수를 위하여 크레인 제어부를 핫셀 내 크레인 모터 부근에 설치하지 않고, 운전구역 내 별도로 마련된 캐비닛에 설치하였다. 즉 제어부와 크레인 모터가 원거리로 이격되어 설치 및 운영되고 있는 것이다. 하지만, 반복적인 부하시험의 과정에서 500 kg을 상회하는 고중량물의 하중을 취급하는 경우에 크레인의 Slip 현상이 불규칙적으로 발견되었고, 이는 인버터와 크레인 모터시스템의 이격으로 인한 제어신호 손실이 원인인 것으로 파악되고 있다.

2.2 ACPF 크레인 제어 시스템의 사양분석

ACPF 크레인 제어 시스템에는 벡터 인버터가 사용되고 있다. 벡터 인버터란 모터를 구동할 때 자속 성분과 토크 성분을 속도센서를 사용하여 제어하는 방식을 취한다. 이러한 인버터는 높은 응답성을 가지면서도 정확한 위치 추정성과 고신뢰성을 동시에 요구하는 Servo급 시스템에 일반적으로 적용된다. 초기 ACPF 설계 시에, 단순한 중량물 취급 이외에도 핫셀 내 공정장치에 대한 원격취급을 위해 인셀 크레인의 사양을 위와 같이 선정하였을 것으로 판단된다. Table 1은 ACPF 크레인 모터부의 사양 및 주요 시험결과를 나타내고 있다.

Table 1. ACPF Motor Spec. and Field Test Results

Motor Specifications	
Output	0.25 Kw
Poles	12 P
Phase	3φ
Frequency	60 Hz
Speed	520 RPM
Voltage / Current	440 V / 1.5 A
Full Load Test	
Output	0.25 Kw
Current	1.48 A
Efficiency	50.9%
Slip	13.8%
Temperature Rise Test	
Load	1.49 A
Stator / Frame	57°C / 52°C

모터의 일반적인 극수(Pole)는 12P, 8P, 6P, 4P, 2P이며 모터를 구동하기 위한 통상 주파수는 50 Hz 또는 60 Hz 이다. 모터의 회전수를 계산하기 위해서는 극수와 주파수간의 상관관계에 대한 정보가 필요하며, 이는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$RPM = 120 * f / P * (1-S/100) \quad (1)$$

식(1)에서 P는 극수 (12P, 8P, 6P, 4P, 2P), f는 운전 전원 주파수, S는 모터 회전축의 미끄럼율을 각각 의미한다. ACPF 크레인의 경우, 각각 60 Hz, 12극 및 13.8%이므로 위의 식에 대입하면 약

517.2 RPM이 산출되며, 이러한 결과는 Table 1에서 제시한 설계사양인 모터 회전수 520 RPM과 대략적으로 일치함을 확인할 수 있다. 하지만 서론에서 언급한 바와 같이 현장 시험과정에서 고중량물의 취급 시에 간헐적으로 Slip이 발생하는 상황이 발견되었으며, 이와 관련하여 제어시스템에 대해 좀 더 심도 있는 고찰이 필요하게 되었다.

2.3 ACPF 크레인 제어 시스템의 개선을 위한 제언

당초 ACPF 크레인 시스템은 정밀한 핫셀 내 원격 취급을 위하여, 정기적인 관리가 필요한 구동부 감속기의 사용을 최소화하는 동시에, 저속/고속의 가변 속도를 구현하고, 특히 저속운전 시에 고정도의 제어 성능을 확보할 수 있는 높은 극수의 모터를 선정하여 탑재한 것으로 파악된다. 이와 관련하여 파악된 본 크레인 시스템의 문제점은 다음과 같다. 첫째, 현재 설치된 12P 모터의 적절성이다. 즉, 현시점에서 12P 모터를 원활히 지원하는 산업용 인버터의 수급이 용이하지 않으며, 현재 설치된 인버터의 경우에도 검증된 파라미터 값의 부재로 인하여 12P 모터와의 상성에서 문제점을 노출하고 있다. 둘째, 인버터와 크레인 모터사이의 배선거리이다. 즉, 이들 거리가 긴 경우, 특히 저속운전을 위한 저주파수 출력 시에는 전압강하에 의해 모터의 토크가 저하되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 크레인 전선 설치 시에는 전압강하가 2% 이내가 되도록 두꺼운 전선을 사용하여야 하며, 제어 배선도 쉴드선을 사용하여 가능한 한 30 m 이내로 설치하여야 한다. 현재 ACPF의 대략적인 제어 배선 거리는 30 m 내외로 파악되고 있으며, 이는 위의 권장 거리기준의 상한치에 해당하므로 충분한 여유라 할 수 없다. 이상의 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 인버터 시스템에 대한 기술지침[2]을 바탕으로 주파수 설정단자와 출력단자를 원거리에서 제어할 경우에 적용하는 신호변환기를 중간에 설치하여 제어신호를 DC 4-20 mA 전류 신호로 변환하여 사용하는 한편, 현재의 모터 하우징을 그대로 유지하면서 모터의 극수를 8P로 낮추는 방안을 고려하고 있다. 물론 이러한 경우 식(1)에 의해 크레인의 운전속도가 다소 상승하나, 실질적 상승 폭이 크지 않으며 더욱이 산업계에서 지원하고 있는 8P 인버터를 사용하므로, 현장 테스트 및 제어 파라미터 튜닝을 통해 안정적인 성능을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 ACPF와 동일한 조건을 가지는 8P 모터 시험 시스템을 구축중이며, 본 시스템의 실험결과는 별도로 제시할 예정이다.

3. ACPF 인셀 크레인 구동부 분석

실제 Hot test 돌입 이후에는 ACPF 크레인 시스템에 대한 직접적인 핫셀 내 유지보수 작업이 곤란하다. 따라서 정기적인 점검 및 보충이 필요한 크레인 동력부의 윤활제 사양에 대해서도 신중한 검토가 필요하다고 할 수 있다. 현재 방사선 환경에서 Grease 와 Oil 의 예상 손상분기점은 약 106 Gy 정도로 알려져 있으며, 내방사선 제품의 경우에는 107 Gy 정도로 파악되고 있다[3]. 따라서 ACPF의 운영 환경에서 Grease 와 Oil 의 경우에는 크게 영향을 받지 않을 것으로 판단된다. 다만, 전술한 바와 같이 본격적인 시설 운전 이후에는 크레인 관련 Grease 와 Oil의 누유에 대한 유지보수가 용이하지 않으므로, 가능한 한 장주기의 수명을 가지는 그리스("Super Lube" 제품군)를 선정하여 적용하였다.

4. 결론

본 논문에서는 사용후핵연료 환원공정 실험을 위해 개조된 개량형 ACPF 핫셀 내에서 운영되고 있는 인셀 크레인의 운영 및 반복실험 과정에서 도출된 현안들을 분석하고, 그에 대한 개선안을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 개선안들은 현재 구축중인 테스트베드를 통해 타당성을 검증할 예정이다.

5. 참고문헌

- [1] S.N. Yu, J.K. Lee, B.S. Park, I.J. Cho, and K.H. Kim, "Hot cell renovation in the spent fuel conditioning process facility at the Korea Atomic Energy Research Institut", Nuclear Engineering and Technology, 47(6), 776-90 (2015).
- [2] 한국에너지공단 정보교류센터 기술자료: http://www.kemco.or.kr/iecenter/net/business_view.asp?clubid=207&boardcode=energy&itemid=5581(최종접속일: 2016년 8월 27일).
- [3] 진재현, 박병석, 안성호, 최민규, 홍동희, 윤지섭, "핫셀내 장치의 원격 유지보수를 위한 천정 이동 서보 매니플레이터 시스템 개발", 한국원자력학회 2003년 추계학술발표회 논문집 (2003).