2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

IDP사 원심식 충전펌프 축 손상 고찰
A Study on Centrifugal Charging Pump Shaft Failure Investigation

조성득, 김봉건

한국전력공사
울산광역시 울주군 서생면 신암리 991

요 약

원심식 충전/안전주입펌프의 펌프 축은 과거 몇 년에 걸쳐 손상을 경험하였다. 펌프 축 손상은 심각한 비상 정비와 정비비용을 필요로 한다. 1977년 이전에 제작된 충전펌프 축을 금속학적으로 조사한 결과, 고정너트 나사 뿌리 또는 분할 링 그루브, 및 고주파수 피로 손상의 진전과 같은 응력 집중부에서 균열이 시작되었다. 웨스팅하우스는 재질 조건(열 처리) 변경과 설계 향상을 포함한 일련의 개량과 개선을 수행하였는데, 펌프 축 개선 연구는 특히 축의 설계수명을 향상시켰다. 개선된 축에 대한 최근의 고장조사는 환경조건에 의해 유량상실 또는 가스 결합과 균열에 견디는 펌프 축 저항의 감소와 같은 설계부하를 벗어난 조합에 의해 이들 고장이 개시되었다. 펌프 축의 수명연장을 위한 대체 재질의 평가와 재질증명을 실시하였다. 최종 선택된 변경 축 재질은 Custom Age 625이며, 펌프 제작사인 IDP사는 이 재질을 적용하여 펌프 축의 운전수명을 증가시키고 있으며, 국내 발전소도 개선된 축 재질을 적용하여 사용하고 있다.

Abstract

Pump shafts in the centrifugal charging safety injection pumps in PWRs have been subject to occasional failures over the past several years. Service experience showed that the pump shaft failures can result in significant emergency repair and maintenance costs to the plant. Metallurgical investigations of the pump shafts fabricated prior to 1977 confirmed that the cracking was initiated at stress concentration sites, such as a locknut thread root or a split ring groove, and progressed by a high cycle fatigue mechanism. Westinghouse implemented a series of improvements and upgrades to increase the safety margins and to mitigate the effect of the off-design operating conditions. These included design enhancements as well as material condition(heat treatment) modifications. The pump shaft upgrading program significantly improved the design life of the shafts but did not fully mitigate the issue. Investigation of recent failures of the upgraded shafts suggested that these failures are initiated by a combination of off-design loading events such as loss of flow or gas binding and a reduction of pump shaft resistance to cracking due to the aqueous environmental conditions.

1. 서 론

원자력발전소에서 충전/안전주입 펌프는 1차계통의 주요 기기 중의 하나이다. 원심식 충전펌프의 3가지 주요 기능은 원자로냉각재계통으로 충전유량 공급, 원자로냉각재펌프로의 밀봉 주입수 공급, 및 냉각재상실사고와 증기관 파열과 같은 비상사고 발생시 원자로냉각재계통으로 고압안전주입유량을 공급하는 것이다. 이 논문에서 연구의 대상이 되는 충전펌프는 Pacific Pumps Division(현재의 Ingersoll Dresser Pump Co,. 또는 IDP) 회사에 의해 제작된 모델 2-1/2″ RL-IJ(2.5″, 11단, 수평, 원심식, Barrel-type, 1850rpm, 150gpm)이다. Model 2-1/2″ RL-IJ 충전펌프는 웨스팅하우스 가압경수로 50개의 발전소에 122대가 설치되어 운전 중이다. 고찰 범위는 미국과 고리원자력 2발전소의 충전/안전주입펌프의 축 손상 내용, 축 재질 개선 및 수명향상을 위한 후보 재질의 시험과 평가를 통해 재질을 개선한 것이다. 재질 개선을 통해 펌프의 운전수명을 향상시키고, 펌프를 장시간 운전하여 최소의 정비비용을 유지할 수 있다. 현재의 펌프 축은 ASTM A276 type 414 스테인리스 강 재질을 1150°F에서 뜨임하여 제작하였다.

설계범위 밖의 부하원인을 확인하기 위해 WOG(Westinghouse Owners Group)에서 축 손상 조사 노력과 WCAP(Westinghouse Commercial Atomic Plant) 보고서[1]가 최근에 완료되었고, 펌프 운전관행을 이해하기 위해 산업계의 검토과정이 수행되었다. 펌프 축의 수명연장을 위한 교체 후보 재질의 평가와 재질증명을 위해 1995년 완성된 축 재질 개선에 그 결과를 기술하였다[2].

2. 원심식 충전펌프 축 손상 조사

초기 펌프 축은 ASTM A276 type 414 스테인리스 강 재질을 1000°F에서 뜨임하여 제작하였다.

2.1 초기 손상과 조사

펌프의 축 균열문제는 1977년 이전, 펌프 축 고장으로 40개 펌프 중 9개가 운전에 영향을 미치는 것으로 보고되었고 처음 인식되었다. 이들 펌프들의 축은 1,000°F에서 뜨임(Tempering) 한 A-276 type 414 스테인리스 강 재질로 제작하였다. 몇 개의 손상 축에 대해 금속학적 조사를 수행하였다. 평가는 표면 검사를 포함한 펌프 축의 파열 끝, 금속학 및 금속의 파면에 대한 현미경 관찰, 기계적 성질시험과 화학적 평가에 초점을 맞추었다. 기계적 성질시험에는 경도 측정, 인장시험과 샤르피 인성시험이 포함되었다. 전체적인 조사 목적은 펌프 축 균열 원인과 손상 전개과정 확립 및 시정조치에 도움이 되기 위한 정보의 개발이다.

균열 위치는 고정너트 나사 뿌리와 분할 링 그루브 중의 하나이며, 이곳이 응력 집중효과에 의해 응력이 높았다. 파열면은 축을 가로질렀다. 손상된 펌프 축의 운전 상태 표면검사는 축의 평형 드럼 안착부 위치에서 원주방향 마모 자국이 발견되었다. 자국의 표면은 산화 이물질의 흔적이 없이 빛났으며, 마모 손상은 축 손상 때까지 존재하였다. 마모 손상의 존재는 축이 진동부하를 받고 있었다는 것을 알려준다.

전체적인 평가결과를 기초로 하면, 펌프 축의 균열은 고주파수 피로현상에 기인한 것으로 귀결된다. 일반적 손상에서 나타난 파열조직의 입자간 현상은 축 재질의 파괴면 천이온도(Fracture Appearance Transition Temperature; FATT) 범위(또는 이하)에 의한 것이다. 원주방향의 마모자국 증거는 심각한 축 상태에서 진동 부하가 원인이다. 축 외경표면의 나사뿌리(또는 분할 링 그루브)에서의 응력집중이 균열 시작의 원인이다.

2.2 향상과 개선

펌프 축 문제를 완화하기 위해 일련의 펌프 성능향상과 개선조치가 5~6년 동안 개발되었고 수행되었다.

가. 축 재질 열 처리 변화

1972년에 처음 조치가 취해졌고, 설계 증진차원에서 축 재질의 기계적 성질 향상을 위해 열 처리를 변경하였다. 1972년 강 제조 규격 개정 전에, 414 축 재질은 1814°F에서 공기 냉각한 오오스테나이트였고, 1000°F에서 뜨임한 후 다시 공기 냉각하였다. 개정된 규격의 강은 1814°F의 같은 온도에서 오오스테나이트화 하였으나, 이것을 기름 담금질하였고, 1150°F에서 뜨임한 후 공기 냉각하였다. 웨스팅하우스의 시험결과, 초기 시편에 대한 열처리 결과 파괴면 천이온도가 355~400°F인 반면, 개선된 규격의 FATT는 약 120°F였다[1]. 뜨임 개선된 규격에 대한 낮은 FATT는 충전/안전주입 펌프의 정상운전온도(105~130°F)에서 매우 많은 장점이 고려되었다. 환경영향에 의한 피로 실험결과 개선된 규격이 12%가 증가한 것으로 조사되었다. 샤르피 충격시험에서는 뜨임 온도 증가에 의해 충격강도가 300% 증가되었다. 충격강도의 개선은 축의 파괴인성을 상당히 증가시키고 노치(Notch)에 대한 민감성을 감소시킬 것이다. 연구 결과 발전소의 모든 구(舊)형 축을 뜨임한 개선된 축으로 교체할 것을 권고하였다.

나. 설계 변경

1980년 말에, 5개의 축 손상이 추가로 발견되었다. [그림 1]에서와 같이 모든 손상은 2단, 4단 또는 11단의 분할 링 그루브 또는 평형드럼 고정나사에서 나타났다. 그 결과, 웨스팅하우스 재료시험 자료와 웨스팅하우스 R&D 손상 전문가의 지원아래, 응력 집중요소와 축 부하의 최상의 예상모델을 사용하여 고정나사와 분할 링 그루브에 대해 세밀한 분석을 수행하였다.

초기 설계 값을 초과하는 부하에 대해 의심하고, 제작사는 축 부하에 초점을 맞추어 펌프의 기초적인 시험을 착수하였다. 평형드럼에서의 축 종단부에 나타난 들림 경향은 레이디얼 베어링에서의 수력학적 베어링 수막으로 결론지었다. 이 축 들림은 또 다른 고정너트 지역의 굽힘 부하로 나타났다. 충전펌프 축 나사부에서의 고정너트 예상손상에 대한 편광 탄성 분석은 증가된 부하에 의한 것으로 나타났다. 따라서, 축 정렬 절차를 개선하였다.

웨스팅하우스와 Pacific 펌프사는 평형드럼 고정너트와 축 나사에 대해서 재설계를 착수하였다. 초기 한 조각 고정너트의 설계에서 새로운 두 조각 경사너트로 변경[그림 2]하였는데, 개선된 2조각 너트를 사용한 결과, 축 나사를 통해 보다 균일한 응력분포를 나타내었으며[그림 3], 모든 영향 펌프에 사용할 것을 권고하였다. 원래의 고정너트를 사용하여 500시간 운전한 후에는 축 상태를 보증할 수가 없기 때문에, 500시간을 초과하는 운전상태의 축은 교체를 권고하였다. 신규 교체 축은 절삭나사 대신에 잠재적인 응력 집중계수를 감소시키기 위해 전조 나사로 제작하였다. 새로 교체한 회전 집합체를 구입하였을 때, 개선된 한 조각 고정너트를 설치하였다. 이 설계는, 고정너트가 평형드럼의 내부 면이 아닌 외부 면에 접촉하였다. 또한, 새로운 또는 다시 제작한 평형드럼을 요구하였다.

2.3 미국에서의 최근 손상 - 손상기구와 원인 평가

1981년부터 펌프 축 개선 프로그램이 축의 운전수명을 상당히 개선하였어도, 이 문제를 완전히 완화하지는 못했다. 1982~1994년의 축 손상에 대한 보고서는 최소 16건이 보고되어 검토되었

다[1]. 웨스팅하우스가 고장 조사한 결과, 최근 발생한 축 균열은 정상운전 부하 상태에서 고응력 피로(High Stress Fatigue)로 시작되어 고장으로 진전되었다. 설계 값을 초과하는 계통 조건에서의 기기 운전은 알려지지 않은 원인을 고장으로 추정할 수 있다. 의심되는 원인은 발전소 계통 세정과정에서 유체의 일시적 상실, 높은 가스 농도와 가스 덩어리에 의한 가스 결합, 이물질 유입, 잘못 정렬된 상태에서의 운전, 입구 또는 출구밸브가 닫힌 상태에서의 운전 등이다.

최근과 초기의 축 고장에 대한 조사 결과를 검토하니 물의 환경(PWR)이 균열에 잠재적인 역할을 한 것으로 알려졌다. 초기 고장에 대한 금속조직 조사는 결정입계 조직과 파열조직에 2번째 균열이 존재하였다. 이것이 1000°F에서 뜨임한 A414 스테인리스강의 높은 FATT에 영향을 미쳤다고 하더라도, 최근의 조사 결과는 1150°F에서 뜨임한 축에서 압도적으로 많았다. Type 414 스테인리스강이 水 환경에서 피로 고장에 잠재적 기여를 한 것으로 추가 조사되었다.

총 21개 펌프의 손상을 연구하였으며, 여기에는 16건의 축 관련 고장(bent 3, 균열 5 및 축 파손 8)과 회전부분의 고착 또는 심각한 성능저하를 포함한 5건의 고장이 포함되었다. 처음 8건의 축 고장은 1982년에서 1992년 사이에 발생하였으며, 두 번째 8건의 축 손상은 그 후 2년에 걸친 1993년과 1994년에 발생하였다<표 3>.

2.4 고리원자력 2발전소 축 손상

동일한 모델의 충전/안전주입펌프가 고리 3, 4호기와 영광 1, 2호기에 설치되어 있다. 고장 보고서에 의하면, 1985년부터 2000년까지 고리 3, 4호기에 설치된 6대의 충전펌프에서 총 10건의 손상사례가 발생하였다. 고장원인으로는 미국에서와 비슷하며, 입/출구 밸브의 부적절한 정렬, 유체의 일시적 상실, 고-사이클 피로와 반복 충격하중, 회전 굽힘 응력, 공기 또는 가스의 유입 가능성 등이다. 10건의 보고서를 검토해 보면, 축의 절단이 3건, 축의 휨이 2건, 축의 고착이 1건이며, 4건에 대해서는 명확하게 기술되어 있지 않다. 고리 3호기에서 8건의 고장이 발생하였으며, 고리 4호기는 2건이다. 영광 1, 2호기는 축의 절단 등과 같은 고장사례가 보고되지 않았다[4].

3. 축 재질 개선-교체 대상 후보 재질 선정

WCAP 보고서의 축 재질 개선을 위한 연구 범위는 다음과 같다. 축 손상의 원인과 고장 전개과정 증명 및 지금까지 나타난 펌프 축 손상에 대한 모든 평가와 증명의 검토, 축 손상을 완화하기 위해 펌프 축의 교체 후보 재질 선택을 위한 기준 확립, 부식저항, 피로, 인장강도, 파괴면 천이온도(FATT)와 파괴인성과 같은 우수한 성질을 갖춘 후보 대체 재질을 증명할 가용한 문헌과 관련 보고서 검토를 통한 실행, 현재의 펌프 축 재질과 후보 재질간의 성질 비교 및 가능한 자료를 기초로 한 사전 순위 결정, 현재의 재질을 참고로 하여 손상 방지 여유도 증진을 위해, 최종 후보 군에 대한 선별된 시험 프로그램의 증명 등이다. 손상된 15개 펌프 축의 손상 조사결과에 바탕을 둔 축 재질 개선에 대한 연구결과는 다음을 제시한다. 환경에 의해 발생된 고장은 고주파수 피로 메커니즘에 기여하며, 다양한 결정입간 정도의 존재는 펌프축의 파열 행동에서 볼 수 있다. 균열 개시는 응력 집중계수와 부드러운 표면 모두에서 발생하였다. 2차 균열의 증거는 대부분의 예에서 볼 수 있었다. 펌프 축 재질의 운전온도 범위 내의 FATT와 부식피로에서 설계 문턱값을 초과하는 설계운전 부하를 벗어난 손상 등이다. 펌프 축의 대체 후보 재질을 선택함에 있어서의 기준은, 적절한 강도, 더 높은 인성, 낮은 노치 민감성, 낮은 파괴면 천이온도(FATT), 아주

우수한 부식저항, 물 환경에서의 향상된 피로강도이다.

3.1 초기 후보 재질 선정

ASTM A276 type 414 스테인리스강 축 재질을 참고로 하여 가능성 있는 대체 후보재질을 일치시키기 위해 현존하는 문헌, 보고서 및 제작사 정보 검토를 수행하였다. 초기의 가능성 있는 8개의 후보 재질 목록은 Type 422 스테인리스강(S-Steel), Nitronic 50, Custom 450, PH 13-8 Mo Steel, Custom Age 625 Plus, AerMet 100, Ferralium SD40(Duplex), 15-5 PH VAC CE 이다.

3.2 최종 선정재질

초기 선정재질을 면밀히 검토한 결과 후보재질 8개 중 4개를 선정하였다. 탈락된 4개 재질은 재료의 성질에 대한 자료를 비교하여 선정하였다.

Custom 450 재질은 초기 웨스팅하우스 프로그램에서 이미 시험하여 제거하였는데, 1150°F에서 뜨임한 414 스테인리스강 축 재질과 비교해 볼 때 단지 가장자리만 우수한 것으로 판명되었다. 페라이트계 스테인리스강 Type 422는 민감한 연성-취성 천이(414와 비슷)가 존재하여 제거하였고, 증기와 물의 상태에서 환경효과 경향이 있다. 다음 자료가 최종 4개의 후보에 대한 재료 성질을 종합한 것이다<표 1>.

가. Armco Nitronic 50

Armco Nitronic 50 스테인리스강은 부식저항과 강도의 조화를 가졌으며 이 가격 범위에서 다른 어떤 상업적 재질을 발견하지 못했다. 이것은 오오스테나이트 강으로 부식저항이 316과 316L 보다 높으며 RT(Room Temperature) 항복강도는 두 배이다.

나. Custom Age 625 Plus (Carpenter Technology Corporation)

Custom Age 625 Plus 합금은 316과 316L보다 부식저항이 대단히 우수한 석출 경화성의 니켈기(Nickel-base) 합금이다. 이것은 응력부식균열(SCC), 황 SG, 점식 및 틈새부식에 대한 저항과 강도가 특출한 조화를 이룬다.

다. Ferralium Alloy SD40 (Langley Alloys)

Ferralium SD40은 해수와 다른 염소 환경에서 점식과 틈새부식에 대해 우수한 저항을 지닌 Super duplex 스테인리스강이다. Duplex 스테인리스강(이상 스테인리스강)과 비교할 때 강도가 특별히 높으며, 대기온도와 영하의 온도에서는 우수한 연성과 충격강도를 지닌다.

라. ARMCO 15-5 PH VAC CE

ARMCO 15-5 PH VAC CE는 석출 경화형 스테인리스강이며, 높은 강도와 경도가 잘 조화를 이루고, 양호한 부식저항 및 우수한 횡단 인성과 양호한 가단성(Forgeability)이 있다.

3.3 축 재질 개선에 따른 이익

축 재질 개선에 따른 이익은 다음과 같다.

① 개선된 응력 여유와 펌프 축 내구성 확보를 위한 재료 기술 분야에의 이용
② 펌프의 전체 신뢰성 증가를 통해 축 운전수명 증가
③ 펌프 축의 손상 감소에 따른 발전소 정지시간 감소
④ 80만 달러에서 100만 달러에 이르는 평균 비상복구비용의 절약

⑤ 축 재질 개선의 수행은 펌프 내구성 증진을 위한 최소의 비용과 최고의 편리한 수단

4. 수명향상을 위한 후보 재질의 시험과 평가

손상기구에 대한 후보 대체 재질의 시험과 평가를 하는 목적은, 후보 펌프 축 재질의 운전 성능 평가를 위해 기계적 성질과 부식에 기인된 고주파수 피로시험 지원을 위한 시험을 수행하고, 현재의 414SS 강 재질의 손상과 관련한 여유도를 증진하기 위해 최적의 후보 교체재질을 선정하는데 있다.

4.1 시험 재질

총 4개의 후보 재질 중 시험과 평가를 위해, 현재의 재질과 비교하기 위해 3개의 후보 재질을 선택하였다. 이들 4개 재질의 상업적 공급자에서 획득한 생산 정보(재료의 성질과 화학성분 인증자료 등)는 <표 6>에서 <표 9>에 기술되었다. WOG에서 권고된 것을 기초로 하면, 3개의 후보 재질 중 단지 2개 재질이 평가를 위해 선택되었다. 평가에 의해 선택된 2개의 재질은 Armco Nitronic 50(Hot rolled), Custom Age 625 plus이며, Type 414 Stainless Steel과 비교하였다.

Nitronic 50 재질은 초기에 mill annealed(풀림) 상태에서 제작되었다. 기본적인 기계적 성질시험을 수행한 후, rolled 상태에서 재료를 2차 열처리한 결과 높은 인장강도를 나타내었다.

4.2 시험과 시험조건

후보 재질의 평가를 위해 2가지 형태의 시험을 수행하였다. 첫 번째 시험형태는 최초 선별시험(screening tests)이며, 이는 후보 재질의 기초자료를 확보하기 위함이다. 이 시험은 인장, 샤르피 인성 및 정적 응력부식시험이다. 두 번째 형태의 시험은 "고장에 영향을 준 부식"시험이다. 이 범주에 포함된 것은 원형 빔 부식지원 고장시험과 펌프 축의 운전수명 향상을 위한 축 방향 부식피로시험이다. 시험조건과 여러 가지 시험자료가 <표 2>에 요약되었다.

시험 시편은 봉 형태의 후보재질 생산품에서 기계 가공하였다.

4.3 시험 절차

인장시험편은 0.505인치 직경의 봉으로 ASTM A370에 따라 시험하였다. 샤르피 충격시험은 ASTM E23에 따라 시험하였으며 시험온도는 대기온도와 120°F이다.

3개의 정적 부하 "3점 굽힘" 고정물은 시편 당 6개이다. 시편에 가해진 부하는 ASTM G39-90에 주어진 표준절차에 따랐다. 각 재질의 3개 시편에 대해 96,400 psi의 부하가 가해졌고, 이 값은 414SS의 항복점이다. 각 재질의 또 다른 3개 시편은 414SS 재질의 75% 항복점에 해당하는 72,600 psi의 부하를 부가했다. 이들은 이온이 제거된 물에 100 ppm의 염화나트륨(Nacl)과 2,000 ppm의 붕산수 용액이 포함된 3개의 용기에 담겨져 설치되었다. 용액은 전 시험기간에 97°F를 유지하였다. 시편들을 용액에서 주기적으로 제거하여 균열 징후를 검사하였다.

회전 빔 시험은 Fatigue Dynamics Inc. 회사가 제작한 부식 적하장치가 부착된 표준 RBF-200 회전 빔 피로장치를 사용하였다. 이온이 제거된 물에 100 ppm의 염화나트륨과 2,000 ppm의 붕산수 용액이 5초에 1방울씩 시편의 노치부에 적하되어 시편을 습분상태로 유지한다. 초기 시편 후에, 기계장치는 최소 속도인 500 RPM으로 회전하여 부식효과가 나타나도록 시간을 주었다. 각 후

보 재질의 10개 시편은 응력 수명곡선의 개발을 위해 여러 가지 부하에서 시험하였다.

제공된 노치 봉 시편의 축 방향 부하 부식 피로시험은 다음 시험 절차에 따라 수행되었다.

각 시편들은 열전대 계측장치가 설치되기 전에 아세톤으로 세척하였다. 열전대는 노치부의 바깥 가장자리에 가용접하였다. 선택된 시험 시편은 용액 용기 속의 장치 속에 설치된다. 그 후 가열램프로 시험온도까지 가열하여 용액과 시편은 115°F로 가열된다. 시편에서 나오는 궤환신호가 설치된 폐회로에서 온도 조절을 한다.

시험을 통해, 용기 속의 용액은 증발되어 증류수를 만든다. 시험동안 노치는 계속 용액으로 덮힌다. 기본 용액은 100 ppm NaCl을 포함한 500 ppm 붕산수로 구성되었다.

4.4 시험 및 평가 결과

각 시편에 대한 시험 결과가 <표 5>에 요약되었다. 인장시험은 414SS, Hot Rolled Nitronic 50과 CA625 Plus 재질이 각각 약 115ksi, 145ksi 및 189ksi 이며, % 연신율은 22, 27 및 33을 나타내었다. Hot Rolled Nitronic 50과 CA625 Plus 재질은 414 재질과 비교할 때 강도와 인성 모두 우수하다. 샤르피 V-노치 인성시험 결과, 414 재질의 샤르피 인성결과는 시험온도인 69°F와 119°F 범위에서 두 개의 후보 재질과 완전히 많은 차이가 난다. 414 재질의 연성-취성 천이는 샤르피 인성 변화 값인 34 ft-lbs~82 ft-lbs이며 141% 변화한다. 반대로, Nitronic 50 재질의 샤르피 인성은 78 ft-lbs~102 ft-lbs로 30% 변화에 비해, CA625 Plus 재질의 인성은 99.5 ft-lbs~107 ft-lbs로 단지 7.5% 변화한다. 이것은 특히 운전 손상의 파괴 형태학이 입간 파열과 종종 관련된 것과 비교하면 대단히 향상된 것이다.

정적 부식응력 시험 결과는, 3개 재질 모두에서 어떠한 가시적인 균열의 시작을 보이지 않았다.

[그림 4]와 [그림 5]의 그래프를 살펴보면, 두 형태의 시험에서 특별히 몇 가지를 관찰할 수 있다. 우선, 후보 재질에 대한 상대적인 거동이 두 시험 방법에서 완전하게 같지는 않지만 두드러지게 비슷하다. 이 두 예에서 보면, Custom Age 625 Plus 재질의 부식과 관련한 부식저항이 모든 부하범위에서 Nitronic 50과 414의 두 재질보다 월등히 우수하다. Nitronic 50의 피로 저항이 414 재질보다 전 범위에서 우수하지만, CA625 재질보다는 좋지 않다. 또 다른 중요한 관찰은 Nitronic 50과 CA625 재질의 우수한 거동이 축 방향 피로시험보다 회전 빔 적하시험의 결과에서 더욱 확실히 나타났다. 요약된 결과를 참고로 CA625 Plus로 축을 채택하면 설계부하에서 피로 한도가 25% 증가하여, 펌프 축(10^{11} 사이클)의 설계수명을 초과하며, 운전부하가 설계부하의 최고 2배에서 3배로 되면 운전수명은 2~5배 증가가 가능하다. 이것은 펌프 축 수명의 상당한 개선이며 설계부하를 초과하는 적정 수준의 저항에도 견딘다. Custom Age 625 plus 재질은 높은 온도에서 성능이 우수한 재질이며 예상되는 적절한 운전온도는 300°F(149℃) 또는 그 이상이다.

5. 결 론

5.1. 1982년에서 1994년까지 발생한 미국에서의 총 21대 펌프의 손상 중, 16건의 축 관련 고장(bent 3, 균열 5 및 축 파손 8)을 포함하여, 회전부분의 고착 또는 심각한 성능저하가 5건이다, 펌프손상의 원인은 다양하며, 이물질 포함, 동반된 가스상태의 운전, 가스 덩어리 포함, 잘못 정렬된 상태로의 운전, 입구 또는 출구밸브가 닫힌 상태에서의 운전 등이 원인이며, 동반된 가스 또는 가스 덩어리와 관련된 손상이 7건이다.

5.2 고리 2발전소의 펌프 손상은, 1985년부터 2000년까지 설치된 6대의 충전펌프에서 총 10건의 손상 사례가 발생하였다. 고장원인으로는 입/출구 밸브의 부적절한 정렬, 유체의 일시적 상실, 고-사이클 피로와 반복 충격하중, 회전 굽힘응력, 공기 또는 가스의 유입 가능성 등으로 다양하다. 보고서 검토 결과, 축의 절단이 3건, 축의 휨이 2건, 축의 고착이 1건이며, 4건에 대해서는 명확하게 기술되어 있지 않다. 특히, 고리 3호기에서 8건의 고장이 발생하였다.

5.3 축 재질 개선에 따른 이익으로, 펌프의 전체 신뢰성 증가를 통해 축 운전수명 증가, 손상 펌프 축 감소에 따른 발전소 정지시간 감소로 비상복구비용을 절약할 수 있다.

5.4 CA625 Plus로 축을 교체하면 10^{11} 사이클 수명을 초과하여 피로 내구 부하한도가 25% 증가하며, 설계부하의 2배에 대한 운전부하에 대해 운전수명은 2~5배 증가한다.

5.5 Hot rolled Nitronic 50의 피로 저항은 CA625 Plus와 비교할 때 설계 값을 초과하는 과도상태 부하에 대해 손상 여유는 적지만, 현재의 414 축 재질보다 월등히 우수하다. Nitronic 50은 CA625와 비교할 때 즉시 사용가능하며 일반적으로 재질 가격이 낮다. 발전소의 교체시기에 대한 가능성과 경제성을 고려할 때 Nitronic 50은 현재의 414 재질을 대체할 만한 두 번째 대안으로 고려된다.

5.6 시험의 종합 결과를 기초로 할 때, 현재의 414 펌프 축 재질을 Custom Age 625 재질로 교체하면 펌프의 운전 수명이 현저하게 개선된다. IDP사는 1998년 3월부터 축 재질을 기존의 ASTM A276 type 414에서 Custom Age 625 plus로 변경하여 제작하고 있으며, 발전소에 개선된 재질의 사용을 권고하고 있다.

<참고 자료>

[1] E. R. Colvin, "Centrifugal Charging Pump Shaft Failure Investigation - Phase 1 Report," Westinghouse Proprietary 2C Report, WCAP-14192 January 1995.

[2] G. V. Rao and E. R. Colvin, "Centrifugal Charging Pump Shaft Failure Investigation Phase 2 Report - Shaft Material Enhancement Program," Westinghouse Proprietary Class 2C Report, WCAP-14409, June 1995.

[3] G. V. Rao and E. R. Colvin, "Centrifugal Charging Pump Shaft Failure Investigation Phase 3 Report - Testing And Evaluation Of Candidate Replacement Materials For Life Enhancement," Westinghouse Proprietary Class 2C Report, WCAP-14801, May 1997.

[4] 한국전력공사 고리 원자력본부, 1985~2000, "원심식 충전펌프 고장보고서"

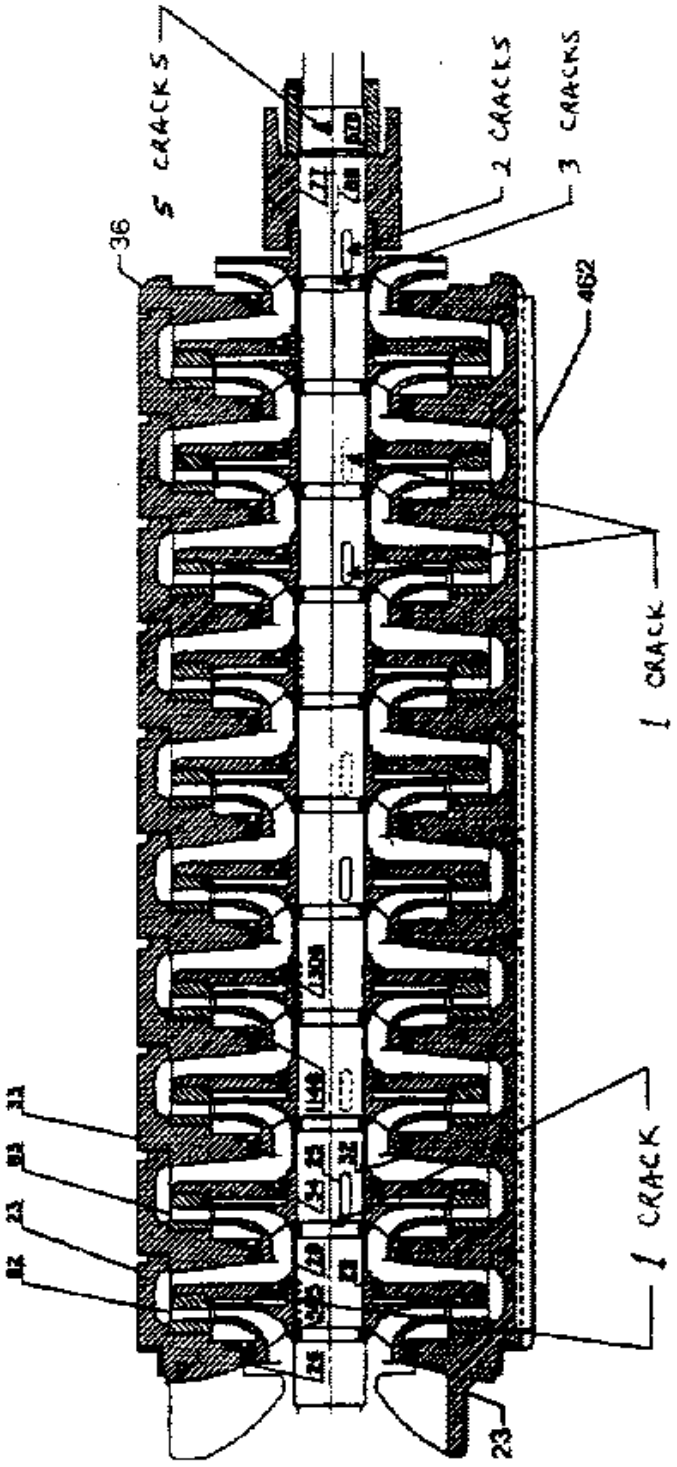
[5] 한국전력공사 고리 원자력본부, 1999, "운전 절차서"

<표 1> 최종 선정 재질의 성질 비교

No.	후보 재질	RT, 인장강도 (KSI)	부식저항	Charpy 인성(RT)	FATT (°F)	피로강도	Notch 민감성	ASTM Spec.
0	현 재질, Type 414 마르텐사이트 스테인리스 강 (1150°F 뜨임)	120	〈평균	26	120	19 (notched)	-	A276
1	Ferralium Alloy SD40	110	양호	66	~-58	부식피로에 대한 저항성이 우수	-	A479
2	Custom Age 625 Plus (Alloy 725)	130	양호 〉718	$74^{L}/68^{T}$	-	-	-	UNS N07716
3	Nitronic 50	138	양호, ≥316 SS	100	~-100	air : 68 SW : 18	양호	-
4	Armco 15-5 PH(VAC CE)	135	평균이상	50	-	~100(air) (unnotched) tension-tension	-	A564

<표 2> Test Matrix

	시험	시험 조건
1	인장	115°F, 공기
2	샤르피 인성	69°F~119°F
3	정적 부식	2,000ppm 붕산수, 100ppm 염소, 115°F 온도, 부하 : 414 재질의 100%와 75% 항복응력
4	회전 빔	2,000ppm 붕산수, 100ppm 염소, 97°F 온도, 낙하율 : 1방울/5초, 500 rpm.
5	축 피로	500ppm 붕산수, 100ppm 염소, 115°F 온도, 10Hz.



<그림 1> Crack Initiation

<표 3> Pump failure history: Plants with failures

번호	Plant	고장 일자	펌프 S/N	펌프 I. D.	SHAFT S/N	Failure Type				파열/균열위치		
						완전 파손	축 균열	축 Bent	축 고착	평형 드럼 나사	분할 링 No	임펠러# 아래
1	CWE	Sep-82	45610	1B	-	×					11	
2	ALA	Mar-84	46354	2A	-	×				×		
3	DLW	Dec-86	46352	1B	NR40048IT53 HT71099-AA	×					2	
4	DDP	Jul-88	49780	2A	BF49224, HT74697-AA		×				11	
5	DCP	Nov-89	52147	1B	BE49224, HT74697-AB			×				
6	FEY	Feb-90	53240	1C	BN-50683, HT-22264	×				×		
7	TVA	Feb-91	45620	1B-B	NR59877		×					11
8	SCP	Feb-92	51674	B	HT74089-AA, AB	×				×		
9	CQL	Mar-93	49182	B	-	×				×		
10	VRA	Jul-93	46359	1C	-			×				
11	AMP	Jul-93	45608	2B	NSO80ITI HT48715-AC33		×					8 & 9
12	CCE	Sep-93	49775	1B	-	×						10/11
13	DAP	Sep-93	48583	1B	31342-88			×				
14	TEN	Jan-94	45622	2B-B	-	×				×		
15	TEN	Aug-94	45621	2A-A	-		×					1
16	DLW	Aug-94	46352	1B	-		×					11
17	GAE	-	52234	-	-				×			
18	GAE	-	52233	-	-				×			
19	ALA	Aug-78	46356	2C	-				×			
20	PSE	Jul-84	45604	12	-				×			
21	FEY	Oct-89	49172	1A	-				×			
총 개수						8	5	3	5	5	3	5
						총 축 고장 : 16, 총 축 고착 : 5						

<표 4> Pump failure history: Plants with failures

번호	Plant	고장 일자	Failure description/Notes	Failure Symptoms
1	CWE	Sep-82	11단 분할 링 그루브를 통한 파손	고진동에 의한 성능저하
2	ALA	Mar-84	축 손상, bent, 재기동시 가스 존재가능	고진동(베어링 OB> 9mils), 값 초과
3	DLW	Dec-86	#1 웨어링 그루브 파손	N/A
4	DDP	Jul-88	sine파의 축 회전, 간극 손실, 80% 균열	유량감소, 전동기 전류 변화, 고소음
5	DCP	Nov-89	내부 rub, 간극 손실, 8~11단 임펠러 그루브	성능 저하, 고진동, 가압기 저-수위
6	FEY	Feb-90	고정너트 나사 파열	-
7	TVA	Feb-91	11단 임펠러아래 280도 균열, 이물질	성능 저하, 전동기 고-전류
8	SCP	Feb-92	1단 고정너트 나사 파열, 공동현상 없음. 2조각 너트	저-유량 경보, 충전/RCP 밀봉수 Zero
9	CQL	Mar-93	4/5단 고정너트 나사 파열, 2조각 고정너트, No 공동현상	RCP 밀봉수-저, 전동기 고-전류
10	VRA	Jul-93	11단의 현저한 bend(5mil), no 공동현상	성능 저하, 전동기 고-전류
11	AMP	Jul-93	#9 키홈을 통한 180도 균열, #8 키를 통한 30도 균열, #1 임펠러 공동현상	성능 저하, 고진동(~10mils)
12	CCE	Sep-93	평가에 의한 근본원인 미발견	2시간 성능 저하, FCV 완전 열림
13	DAP	Sep-93	회전부 긁힘, 밀봉& 베어링 손상, no 공동현상	저유량, 전동기 고전류, 고 밀봉 누설
14	TEN	Jan-94	1st or 2nd 고정너트 나사 근처 파열	성능 저하, 전동기 고-전류
15	TEN	Aug-94	키홈 종단을 통해 약 120도 균열, 근본원인 미발견	계획 교체, 진동 조금 높음
16	DLW	Aug-94	11단 임펠러 아래 균열, 0.030“ 축 runout	성능 저하, 고진동
17	GAE	-	펌프 고착, 공동현상 손상	부적절한 밸브 정렬(출구 차단)
18	GAE	-	펌프 고착, 공동현상 손상	부적절한 밸브 정렬(입구 차단)
19	ALA	Aug-78	펌프 고착, 공동현상 손상	시험운전 30초간 펌프 고착
20	PSE	Jul-84	이물질 유입으로 고착	시험운전 30초간 펌프 고착
21	FEY	Oct-89	펌프 고착, 과도한 열 축적, no 축 균열	-

<표 5> 시험결과 요약

	시험	SA 276-414 재질	HR Nitronic 50	CA 625
1	인장 성질			
	A) 인장강도(ksi)	115.28	145.88	188.97
	B) % 연신율	22.16	27.0	33.16
2	샤르피 인성 (ft-lbs) (69°F ~ 119)	34/82	78/102	99.5/107.0
3	정적 부식	표면 공격 (가시적 균열 없음)	저하 없음/균열 없음	
4	피로한도 향상			
	A) 회전 빔	〉 25%		
	B) 축 피로	~25%		
5	예상 운전수명 향상	5~10		

<표 6> Certificate of Test(Nitronic 50 low strength)

Heat No.	화학 분석										
A14915	C 0.016	Mn 4.95	P 0.014	S 0.010	Si 0.30	Ni 12.67	Cr 20.96	V 0.20	MO 2.17	N 0.28	CB 0.22
	기계적 성질										
	항복 55,140psi		인장 107,200 psi		% 연신율 in 46.4		단면수축률 % 69.2		경도 BHN 197		

<표 7> Certificate of test(Nitronic 50 high strength)

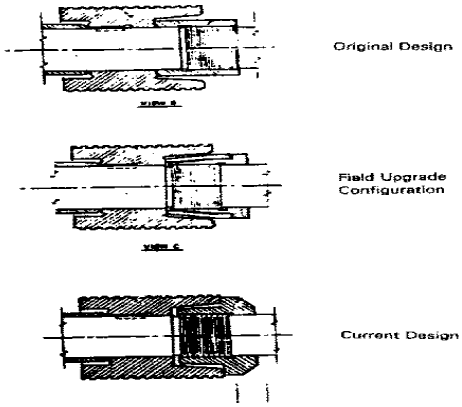
Heat No.	화학 분석										
A16265	C 0.020	Mn 5.02	P 0.023	S 0.008	Si 0.31	Ni 13.39	Cr 20.83	V 0.24	MO 2.19	N 0.31	CB 0.21
	기계적 성질										
	항복 120,200psi		인장 145,100 psi		% 연신율 in 25.4		단면수축률 % 59.7		경도 RC 32/34		

<표 8> Certificate of test(Custom Age 625 Plus)

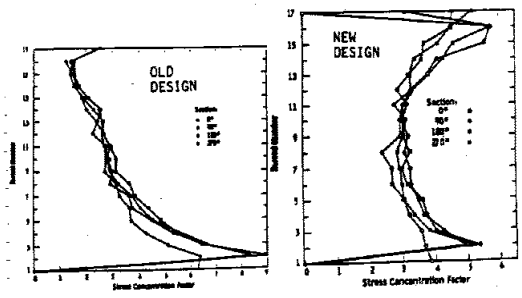
Heat No.	화학 분석										
90480	C 0.007	Mn 0.01	P 0.001	S 0.001	Si 0.04	Ni 60.67	Cr 21.00	Cu LT0.01	MO 8.06	Al 0.19	Ti 1.33
	CD 3.40	TA LT0.02	SE LT 0.0003	B 0.0028	CB+TA 3.42		FE 5.17	PB LT 0.0005		BI LT 0.00003	
기계적 성질(Ingot #1)											
샤르피 V-노치 충격 79~85ft-lbs	항복강도 129/133/ 133ksi		인장강도 180/183/ 183 ksi		%연신율 2in 35/34/34		단면수축률 % 53/53/53		경도 HRC 36~39		
기계적 성질(Ingot #2)											
샤르피 V-노치 충격 67~73ft-lbs	항복강도 136/137/ 137ksi		인장강도 184/185/ 183 ksi		%연신율 2in 35/34/34		단면수축률 % 50/50/49		경도 HRC 36~40		
기계적 성질(Ingot #3)											
샤르피 V-노치 충격 82~83ft-lbs	항복강도 129/128/ 129ksi		인장강도 180/179/ 181 ksi		%연신율 2in 33/34/35		단면수축률 % 54/54/54		경도 HRC 36~40		

<표 9> Certificate of test(414 Material)

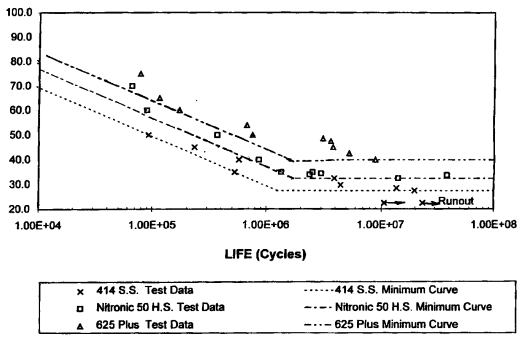
Heat No.	화학 분석						
202316	C 0.14	Mn 0.45	P 0.009	S 0.002	Si 0.38	Ni 1.70	Cr 12.28
	기계적 성질						
	항복 95 ksi	인장 115 ksi	% 연신율 2in 21	단면수축률 % 64	경도 HRC 45		



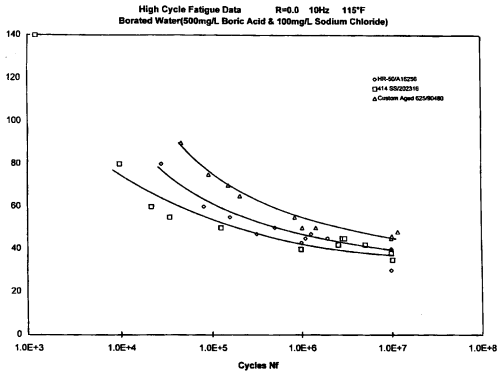
<그림 2> 고정너트와 평형드럼 설계



<그림 3> 설계변경시 응력집중계수 개선



<그림 4> 부식지원 피로시편의 회전 빔 시험



<그림 5> 축 방향 부하에 대한 부식지원 피로시험

<표 10> 고리 3, 4호기 충전펌프 손상사례 요약

번호	Plant	고장일자	Failure description/Notes	Failure Symptoms
1	K-3	Oct-85	공동현상	입구밸브 내부 누설, 펌프 Suction 부분 확보
2	K-4	Mar-87	축 절손, 임펠러, 디퓨져 손상, 밀봉장치 손상	Suction 상실로 Vapor lock현상 이음, 내측 밀봉장치 고-누설
3	K-3	Nov-90	축 절단(11단), 고 사이클 피로, 반복 충격하중	RCP 밀봉수-저, 부적절한 밸브 정렬(출구 차단)
4	K-3	Jun-91	축 절단(11단), 임펠러/Cover bushing/wear ring 마찰 마모, 5단 Wear ring 축에 고착, 1/3/9단 Wear ring이 Skirt에 고착, 반복 충격하중이 원인(INPO), 회전 굽힘응력이 원인(전력연구원)	RCP 밀봉수-저, 밀봉장치 누설, 수동 회전 안됨, 커플링이 전동기 측으로 6㎜이동
5	K-3	May-92	축 휨(10단, 0.35㎜), 임펠러 마모(8~11단) 교체(2~11단)	외측 베어링 고 진동(150㎛), 출구압력 감소, 전동기 부하증가 RCP 밀봉수-저, 펌프 이음
6	K-3	Jun-92	축 휨(10단, 0.36㎜), 임펠러/Wear ring 마모(7~11단), 가스 유입으로 펌프 손상	고 진동(105㎛), 출구압력 감소, 전동기 부하변동, 충전수 감소, 부적절한 밸브 정렬(출구 차단)
7	K-3	Jan-93	축 고착, 임펠러 교체, VCT의 질소 유입으로 공동현상	외측 밀봉장치 누설, RCP 밀봉수-저
8	K-3	Jul-93	SSILS CBM Card 불량으로 펌프 정지	RCP 밀봉수-저, 충전유량-저
9	K-4	Jun-97	추력 베어링 측면부 마모	고 진동(19㎛), 외측 베어링 온도 상승, 내측 베어링 오일 누설
10	K-3	Aug-00	배기 불충분으로 공기 유입 가능성	RCP 밀봉수-저, 출구압력 감소, 충전유량 증가, 수동회전 불량