

원자로냉각재펌프 플라이휠 가동중검사 주기완화 현황

2021. 10. 28

한전기술 원자로설계개발단

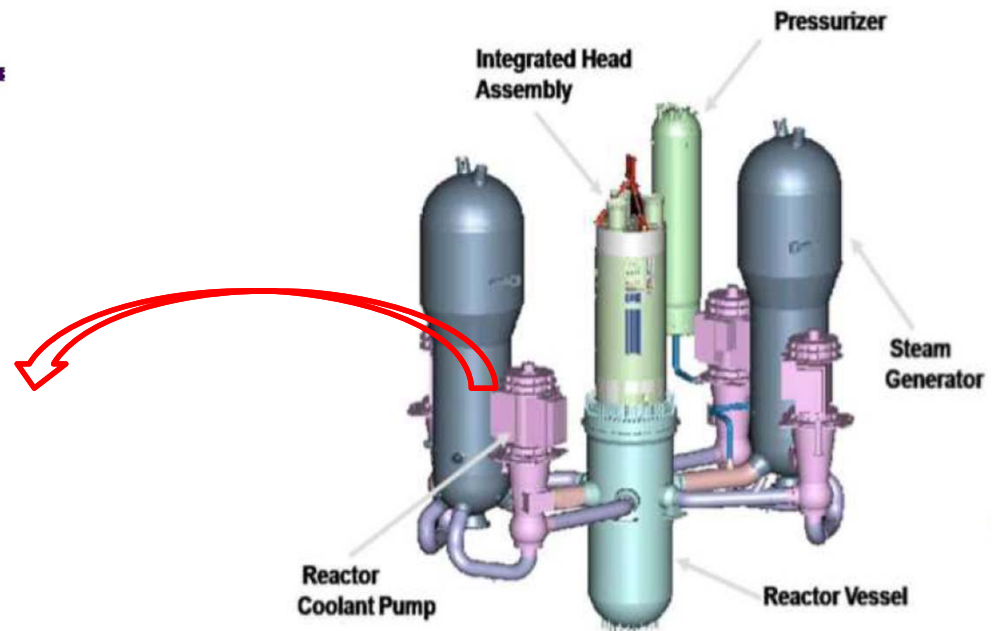
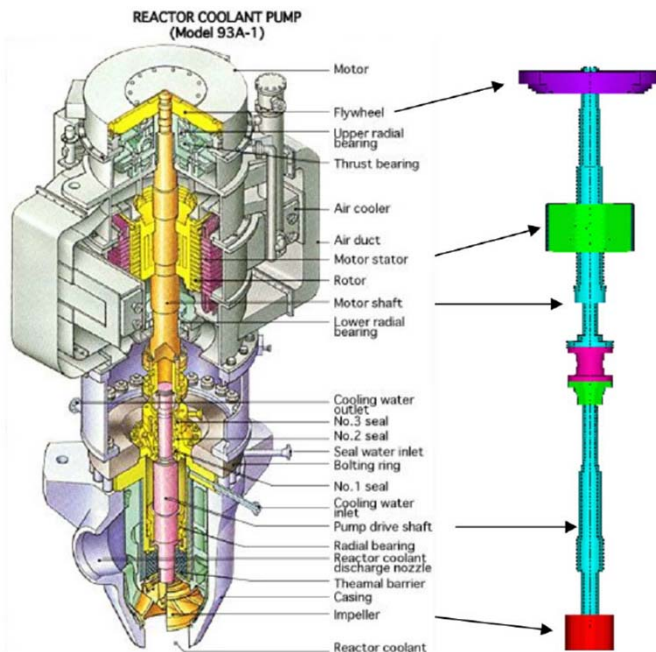
김정만

목 차

1. RCP 플라이휠 일반
2. RCP 플라이휠 가동중검사 국·내외 인허가 요건
3. 해외 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 현황
4. 국내 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 방향

1. RCP 플라이휠 일반

- 원자로냉각재펌프(RCP)는 정상운전동안 원자로 노심으로부터 발생하는 열을 적절하게 제거하기 위해 원자로냉각재계통(RCS)에 충분한 강제순환 유량을 제공
- 원자로냉각재펌프 전동기에 설치된 플라이휠은 발전소 전원 상실될 때에 노심을 적절하게 냉각할 수 있을 정도로 충분한 관성서행(coastdown) 유량을 제공



1. RCP 플라이휠 일반

- 원자로냉각재펌프 플라이휠은 기기공급사마다 사용한 재질, 형상 특성, 그리고 전동기 축과 체결 방법에서 서로 다른 특성으로 설계 및 제작.
- 규제지침(KINS 규제지침, Regulatory Guides 1.14) 요건 만족.
- 플라이휠은 주로 ASME 코드에서 재료특성이 확인된 SA-533-B Class 1, SA-508 Class 2, SA-508 Class 3, 그리고 SA-516 Grade 65 강재로 제조. 표준원전 및 APR1400 원전에 26NiCrMoV14.5 재료가 사용됨.
- 웨스팅하우스 원전의 원자로냉각재펌프 플라이휠은 키(key)를 이용하여 전동기 축과 체결하고, 표준원전 및 APR1400 원전의 원자로냉각재펌프 플라이휠은 수축끼워맞춤(shrink fit)으로 전동기 축과 체결
- 플라이휠의 손상은 높은 에너지의 비산물을 발생하며, 과도한 원자로냉각재펌프 진동의 원인이 되므로 정상운전, 예상과도 그리고 설계기준사고 조건에서 구조적 건전성이 보장되도록 설계되며, 원자로의 가동기간동안 구조적 건전성이 유지되는지를 확인하기 위해 **가동중검사를 수행**

2. RCP 플라이휠 가동중검사 국·내외 인허가 요건

- 원자로냉각재펌프 플라이휠 설계 및 검사와 관련한 국·내외 인허가 요건

국내 인허가 요건	미국 인허가 요건
KINS 규제지침 06장 04절 원자로냉각재펌프 플라이휠의 건전성	USNRC Regulatory Guide 1.14 Reactor Coolant Pump Flywheel Integrity
경수로형 원전 안전심사지침 5.4.1.1 펌프 플라이휠의 건전성	SRP 05.04.01.01 Pump Flywheel Integrity (PWR)
원안위 고시 제2013-02호 운영기술 지침서의 작성에 관한 기준	<ul style="list-style-type: none"> ✓ NUREG 1431 Westinghouse Plants ✓ NUREG 1432 Combustion Engineering Plants

2. RCP 플라이휠 가동중검사 국·내외 인허가 요건

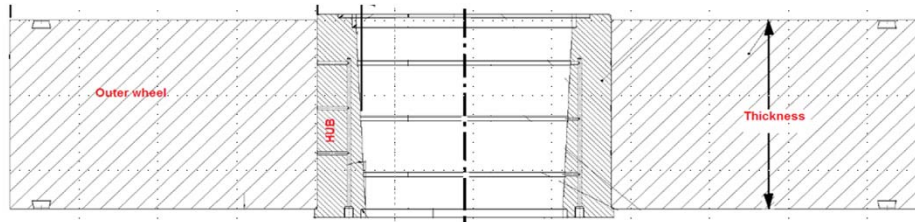
- 플라이휠 설계를 위한 인허가 요건.

정상운전, 예상과도, 설계기준 LOCA, SSE 상태에서 구조적 건전성 보장.

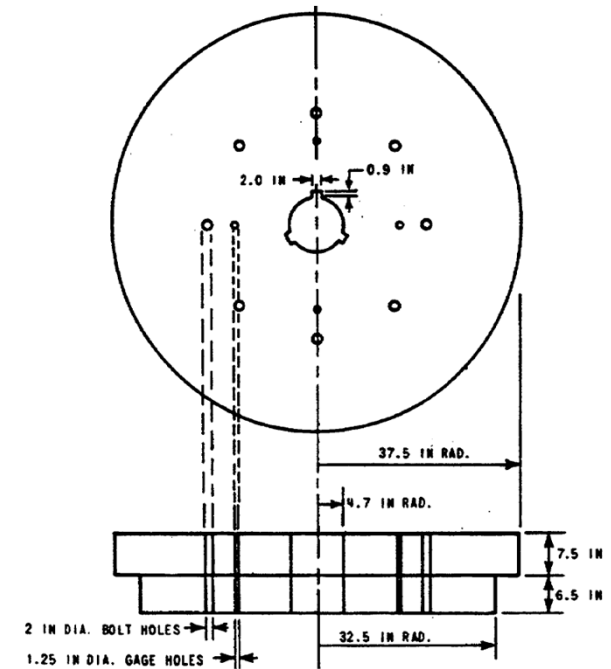
- 1) 연성파괴가 일어나는 예상 임계속도를 해석.
- 2) 비연성파괴가 일어나는 예상 임계속도를 해석.
- 3) 과도변형(excessive deformation)이 일어나는 예상 임계속도를 해석.
- 4) 설계속도는 정상운전 속도의 최소 125%일 수 있으나, 터빈 과속도에 의한 과속보다 커야 함.
- 5) 정상운전 속도는 1), 2), 3)에서 계산된 가장 작은 임계속도의 1/2보다 작아야 함.
- 6) LOCA에 의한 과속은 1), 2), 3)에서 계산된 가장 작은 임계속도보다 작아야 함.

2. RCP 플라이휠 가동중검사 국·내외 인허가 요건

- 플라이휠 가동중 검사.
 - ✓ 연료교체 및 예방정비기간을 고려하여 **최대 응력집중부**에 대하여 약 3년 주기로 초음파검사를 수행(RG1.14 C.4.b(1));
 - ✓ 모든 **노출면**에 대한 표면검사와 100 % 체적검사를 약 10년 주기로 수행 (RG1.14 C.4.b(2)).
 - ✓ 표면검사: 자분탐상시험(MT)
 - ✓ 체적검사: 초음파탐상검사(UT)



Flywheel for OPR1000 and APR1400



Flywheel for Westinghouse

3. 해외 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 현황

- 미국 원자력규제위원회 운영기술지침서 전담(Technical Specification Task Force, TSTF) 활동
 - ✓ 원자로냉각재펌프 플라이휠 가동중검사 주기 확대에 관한 NUREG-1431 개선 가능성을 고시(68 FR 37590, 2003.6.24).
 - ✓ NUREG-1431(표준 운영기술지침서) 변경(TSTF-421)
- WCAP-14535A, Topical Report on RCP Flywheel Inspection Elimination(1996. 11).
 - ✓ 20년 운전경험은 운전으로 유발된 결함 증거가 없음.
 - ✓ 60년 운전동안 피로파괴 성장이 매우 미미함.
 - ✓ 가동중검사가 불필요 함을 제안
 - ✓ 그러나 원자로냉각재펌프 플라이휠 검사 프로그램은 3년과 10년 주기에서 **10년 주기로 변경** (NUREG-1431, 개정2).

3. 해외 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 현황

- WCAP-15666, Extension of RCP Motor Flywheel Examination(2001. 7)
RG 1.14의 설계기준 평가
 - ✓ RCS 배관 LBB에 따라 RCP 과속은 1500 rpm(동기속도 1200 rpm)으로 제한하고, 모든 속도에 대하여 위험 평가 수행
 - ✓ 정상속도는 3가지 임계속도((연성, 비연성, 과도변형))의 절반 이하여야 하며, LOCA 과속도는 3가지 임계속도보다 작아야 함.

Reg. Guide 1.174

- ✓ 1500 rpm 임계 결함 크기 사용,
- ✓ 60년 수명 말기에 임계 결함 존재 확률을 매년 결함 존재 확률로 사용,
- ✓ 피로 결함 성장 모사에 매년 100회 기동-정지 사용,
- ✓ Double-ended guillotine break (DEGB) 파단면적(최대 3.0 ft²),
- ✓ 플라이휠 파괴가 core damage and a large early release event로 이어질 확률= 1.

결과

- ✓ 플라이휠 검사 프로그램은 3년과 10년 주기에서 **20년 주기로 변경**
(NUREG-1431, 개정4).

3. 해외 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 현황

- Westinghouse plants.

개정	NUREG-1431 5.5.7
1	This program shall provide for the inspection of each reactor coolant pump flywheel per the recommendations of Regulatory Position C.4.b of RG1.14, Revision 1, August 1975.
4	<p>This program shall provide for the inspection of each reactor coolant pump flywheel per the recommendations of Regulatory Position C.4.b of RG1.14, Revision 1, August 1975.</p> <p>In lieu of Position C.4.b(1) and C.4.b(2), a qualified in-place UT examination over the volume from the inner bore of the flywheel to the circle one-half of the outer radius or a surface examination (MT and/or PT) of exposed surfaces of the removed flywheels may be conducted at 20 year intervals.</p> <p>-----REVIEWER'S NOTE-----</p> <p>The inspection interval and scope for RCP flywheels stated above can be applied to plants that satisfy the requirements in WCAP-15666, "Extension of Reactor Coolant Pump Motor Flywheel Examination."</p> <p>-----</p>

3. 해외 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 현황

- Combustion Engineering plants.
 - ✓ CE 발전소는 Combustion Engineering Owners Group(CEOG) 차원에서 표준 운영기술지침서 개선을 추진하지 않고 각 발전소마다 원자로냉각재펌프 플라이휠 가동중검사 주기 완화를 위한 운영기술지침서를 개정.
 - ✓ Topical Report SIR-94-080A, Relaxation of RCP Flywheel Inspection Requirements: 플라이휠 검사 프로그램은 3년과 10년 주기에서 **10년 주기로 변경**
 - ✓ 운영기술지침서 개정한 CE형 발전소는 ANO 1,2호기, Millstone 1호기, Palisades, St. Lucie 1,2호기, 그리고 Waterford 3호기.

개정	NUREG-1432 5.5.7
1 ~ 4	This program shall provide for the inspection of each reactor coolant pump flywheel per the recommendations of Regulatory Position C.4.b of RG1.14, Revision 1, August 1975.

4. 국내 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 방향

- 가동중검사 주기완화 필요성.
 - ✓ RCP 전동기 보수(refurbishment) 주기(15~20년)와 RCP 플라이휠 검사주기(10년) 간의 불일치.
 - ✓ Palisades 발전소 1회 비파괴검사비 US\$ 30,729(1995년)
 - ✓ 가동중검사 주기완화는 예방정비 기간 단축, 발전 종사자의 피폭 저감 그리고 발전소 운영비를 절감.

4. 국내 RCP 플라이휠 가동중검사 주기완화 개선 방향

- 고리 2,3,4호기와 한빛 1,2호기.
 - ✓ WCAP-15666은 국내 WEC형 원자력 발전소에 대한 가동중검사 주기완화의 기술적 근거를 제공함.
 - ✓ NUREG-1431, 5.5.7절(개정 4판)의 RCP 플라이휠 검사 프로그램은 3년과 10년 주기에서 **20년 주기로 변경**.
 - ✓ WCAP-15666 근거하여 발전소 **운영기술지침서 개정**.
- OPR1000 및 APR1400.
 - ✓ 가동중검사 주기연장에 따른 구조 건전성 해석
 - ✓ Reg. Guide 1.174 요건을 만족하는 가동중검사 주기연장에 따른 위험도 분석
 - ✓ 발전소 **운영기술지침서 개정**

감사합니다!