원자로냉각재펌프(RCP)의 설계요건에 관한 연구

최순호* · 김경근* · 윤석훈* · 윤두호** · 오병주*** · 최순열****

A Study on the Design Requirements of Reactor Coolant Pump

S.H.Choi · K.K.Kim · S.H.Yun · D.H.Yun · B.J.Oh · S.Y.Choi

<목 차>

Key Words : Departure from Nucleate Boiling Ratio (DNBR, 핵비등이탈율), Flow Resistance Characteristic (유동저항특성), Loss of Reactor Coolant Accident (LOCA, 냉각재상실사고), Minimum Correctable Head (최소가변수두), Nuclear Fuel (핵연료), Pressure Drop (압력강하), Pressurized Water Reactor (PWR, 가압형경수로), Rated Flowrate (정격유량), Reactor Coolant Pump (RCP, 원자로냉각재펌프), Reactor Coolant System (RCS, 원자로냉각재계통), Thermal Design Flowrate (열설계유량)

Abstract

The design requirements of reactor coolant pump is very important factor for the safe operation and cooling of Pressurized Water Reactor. This study is concerned with the design requirements of reactor coolant pump based on the Young Gwang Nuclear Power Plant Unit 3 & 4. We concluded that the PWR system designers shall have an accurate information on the RCP design requirements such as kinetic energy of pump rotating parts, rated flow and head, minimum

* 한국해양대학교
** 부산기능대학
*** 목포해양대학교
**** 군산대학교

allowable slope of H-Q curve and minimum correctable head through this study. This study provide the system designer with a guideline and a basic background on the RCP design requirements.

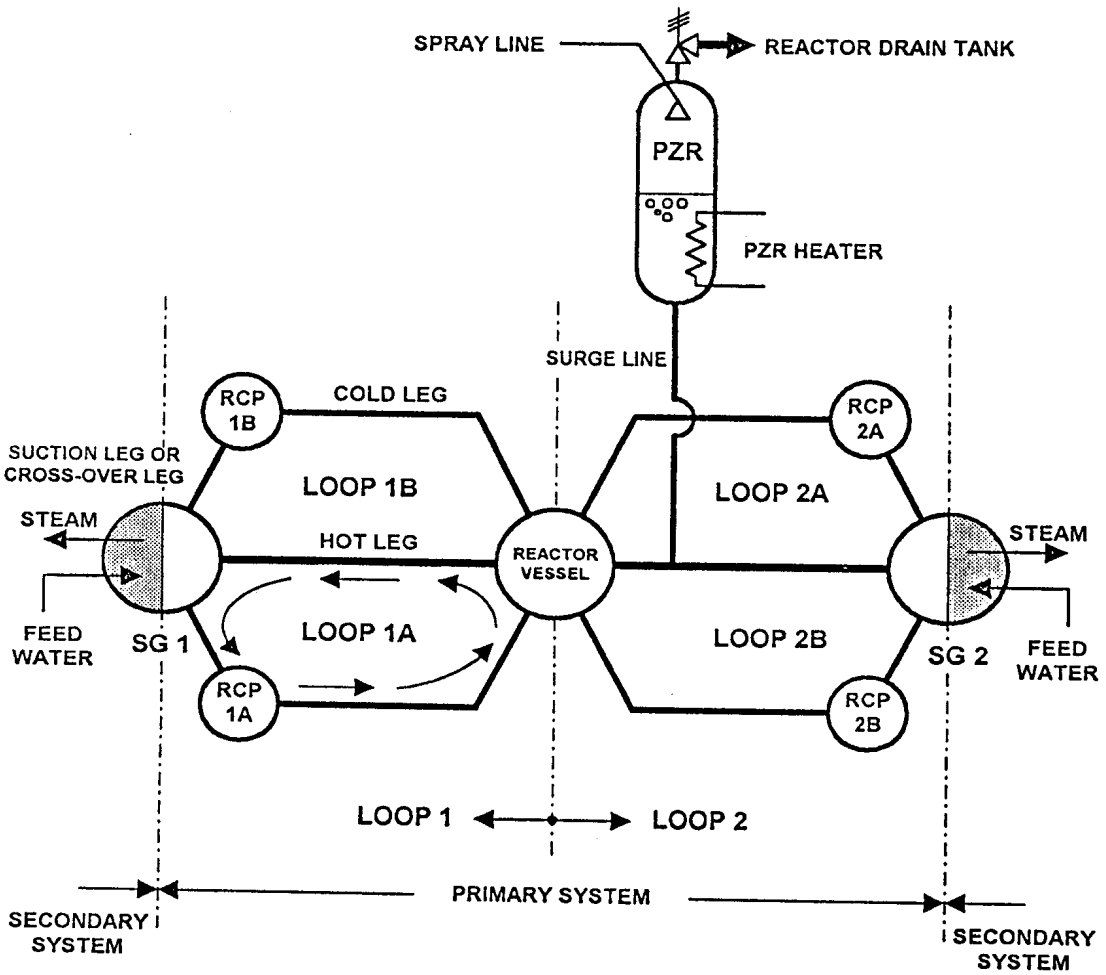
1.0 서 론

원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS)은 Figure 1에 보인 것과 같이 열에너지원(Heat Energy Source)인 핵연료(Nuclear Fuel)를 내장하고 있는 원자로(Reactor Vessel), 터빈-발전기(Turnine-Generator, T/G)의 구동원(Driving Source)인 수증기(Steam)를 생산하기 위한 증기발생기(Steam Generator, SG), 그리고 원자로냉각재를 강제순환(Forced Circulation)시키는 수직원심형(Vertical Type Centrifugal Pump) 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump, RCP) 및 유동관로로 구성되어있다.

RCS 내에서의 유일한 회전기기(Rotating Machinary)인 RCP는 핵연료로 부터의 열제거가 원할히 수행되어 핵연료의 온도가 규정온도 이상으로 상승되지 않도록 충분한 유량의 원자로냉각재를 공급할 수 있어야 하며, 아울러 이 유량이 RCP의 토출구로 부터 흡입구까지의 유동관로를 통해서 강제순환되는 경우 유동에 의한 압력강하(Pressure Drop)가 발생되므로 RCP는 핵연료를 냉각시키기 위해 필요한 원자로냉각재가 이 압력강하를 극복하면서 유동관로내를 흐를 수 있도록 충분한 토출수두(Discharge Head)를 동시에 제공할 수 있어야 한다.

Figure 1에서 알 수 있듯이 RCS를 구성하고 있는 유동계통은 일반 산업계에서 흔히 볼 수 있는 펌프를 포함하는 경우의 유동계통과는 달리 펌프의 토출측에 유량조절밸브나 우회관(By-Pass Line)과 같은 유량제어장치들이 없기 때문에 RCP는 발전소의 전수명기간 동안의 운전기간에 걸쳐서 RCS 고유의 유동저항특성(Flow Resistance Characteristic)에 의해서만 운전점이 결정되어진다. 즉 RCP의 토출측에서 유량제어가 수행되지 않으므로 일반 산업계에서 사용되는 원심펌프와는 달리 RCP는 운전점이 항상 일정하게 유지된다는 것을 의미한다. 이 외에도 RCP는 원자력발전소 고유의 특성에 의해 요구되는 요건들을 추가하여야 하므로 RCP의 설계요건을 작성하기 위해서는 세심한 주의가 필요하다.

본 연구는 영광 원자력발전소 3, 4호기용 RCP의 설계요건에 대한 설명을 예시함으로서 관련업무를 수행하는 계통설계자 및 기기설계자의 원자로냉각재펌프의 설계요건들에 대한 배경과 이해를 돕고 향후 국내에서 지속적으로 건설될 것으로 예상되는 원자력발전소의 원자로냉각재펌프의 설계요건에 대한 기준을 확립하고 지침서의 역할을 하는데 그 목적이 있다.



FLOW PATH OF REACTOR COOLANT

RCP SUCTION→RCP→RCP DISCHARGE→COLD LEG→

REACTOR VESSEL (INLET→FUEL ASSEMBLY→OUTLET)→

HOT LEG→STEAM GENERATOR→SUCTION LEG

FIGURE 1 SCHEMATIC DIAGRAM OF REACTOR COOLANT SYSTEM

2. 0 설계요건

2. 1 회전체의 운동에너지

RCP는 일반 원심펌프와는 달리 회전축에 관성차(Flywheel)가 설치되어 있는데 이는 RCP에 공급되는 전원이 차단되어 냉각재의 유동이 상실되는 사고(Loss of Reactor Coolant Flow Accident)가 발생하더라도 에너지저장고의 역할을 하는 관성차와 펌프 및 전동기의 회전체부품이 관성(Inertia)에 의해서 일정시간 이상 회전이 지속되어 이 기간 동안에도 적절한 냉각재유량이 노심(Core)에 공급되어 노심냉각이 수행될 수 있도록 회전체 전체가 최소한으로 보유해야 하는 운동에너지(Kinetic Energy)를 제공해주기 위한 것이다.

따라서 회전체의 최소운동에너지 요건은 RCP의 관성서행(Costdown)이 요구되는 가상사고(Postulated Accident) 중에서 가장 심각한 사고인 4대의 RCP로의 전원공급이 동시에 차단되는 냉각재의 전유량상실사고(Total Loss of Reactor Coolant Flow Event)가 발생하더라도 - 각본(Scenario)에 의하면 RCP로의 전원차단에 의해 원자로정지신호(Reactor Trip Signal)가 발생하여 제어봉들(Control Rods)이 낙하(Drop)되기 시작할 때까지 1.76초의 시간이 소요되고 SG의 압력방출밸브(Safety Relief Valve)가 열리기 까지는 3.6초의 시간이 소요된다. 이 후 운전원(Operator)이 발전소를 안전하게 정지(Shutdown)시키기 위한 운전을 시작할 때까지는 RCP의 전원상실이 일어난 후로 부터 총 1800초의 시간이 소요 - 초기시간 동안에 노심에서의 핵비등이탈율(Depature from Nucleate Boiling Ratio, DNBR)이 최소한 1.3 이상으로 유지됨과 동시에 RCS와 SG 내부의 압력이 설계압력(Design Pressure)의 110% 이상을 초과되지 않도록 하기 위함이다[1].

영광 3, 4호기용 RCP의 경우 관성서행에 의해 유량이 정격유량의 60%까지 감소되기 까지는 9초의 시간이 소요되며[1] 이를 위해 요구되는 회전체의 최소운동에너지는 $27.5 \times 10^6\, ft \cdot lb$이다[2].

2. 2 정격유량 및 정격수두

영광 3, 4호기용 RCP는 2.1절에서 설명한 바와 같이 원자력발전소의 정상운전중에 노심에서의 DNBR이 최소한 1.3 이상의 값이 유지될 수 있도록 핵분열에너지를 충분히 제거할 수 있는 냉각재유량을 토출할 수 있어야 한다. 핵연료 설계자료들로 부터 결정되는 노심에서의 열제거(Heat Removal)에 필요한 최소유량(Minimum Flowrate)을 RCS의 열설계유량(Thermal Design Flowrate, TDF)이라고 하는데 이는 통상 QD로 표시한다.

영광 3, 4호기의 경우는 $Q_D = 121.5 \times 10^6 lbm/hr$인데 이를 RCP 흡입구에서의 온도(564.5°F)에 대응하는 밀도를 고려하여 1대당의 체적유량(Volumetric Flowrate)으로 환산하면 82500gpm이다.

RCP 1대당의 열설계유량 Q_D=82500gpm은 노심냉각을 위한 최소유량이기 때문에 발전소의 전수명기간(Total Life Period)에 걸친 전출력운전(100% Power Operation)의 보장을 위해서는 발전소의 수명말기(End of Life, EOL)까지 유량측정오차(Flow Measurement Error)를 포함한 경우에도 이 유량은 반드시 만족되어야 한다. 하지만 발전소의 수명말기에는 유동관로내에 부식생성물이

나 찌꺼기의 축적 및 증기발생기 전열관의 관막음에 의해 마찰저항이 증가되므로 Figure 2에 보인 것과 같이 계통저항곡선(System Resistance Curve)이 상승되어진다. 따라서 이를 고려하여 수명말기에도 82500gpm 이상이 토출되도록 RCP는 유량에 여유치를 가져야 한다.

그러나 냉각재의 유동관로에는 원자로의 내부구조물(Reactor Vessel Internal Structure) 및 핵연료와 같이 비교적 강도(Strength)가 취약한 부분들이 포함되어 있기 때문에 RCP의 유량에 일정량 이상의 여유치를 부여할 수 없다. 만일 RCP의 유량에 지나친 여유치를 주게 되면 발전소 수명초기에는 계통저항곡선이 낮기 때문에 과도한 유량이 흐르게 되며 이로 말미암아 유동유발진동(Flow Induced Vibration) 등과 같이 유동에 의해서 발생되는 하중(Load)이 증가되고 이로 인해 이들 원자로 내장품의 피로한도(Fatigue Limit)가 초과되어 파손될 수도 있기 때문이다. 따라서 RCP의 최대유량제한치

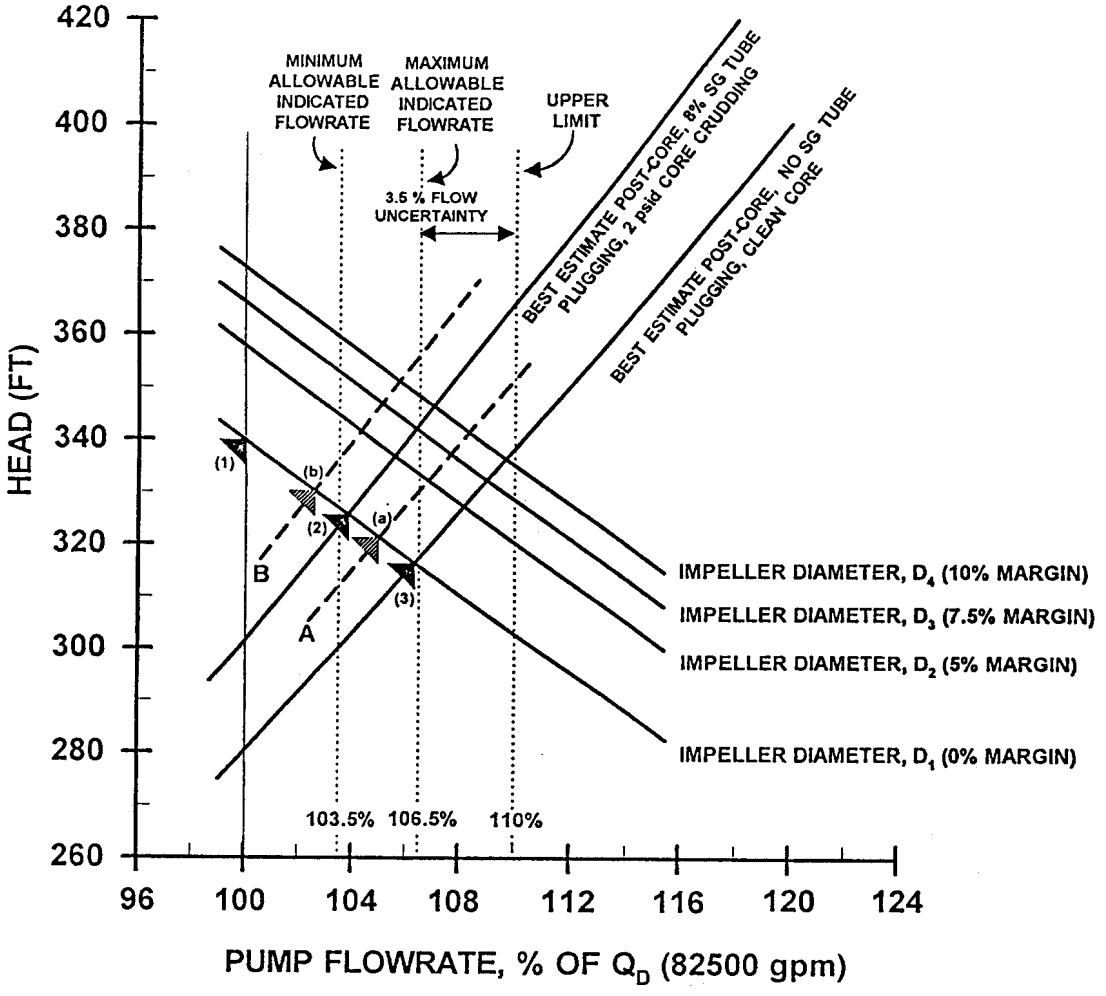


FIGURE 2 H - Q CURVE TO DETERMINE THE DESIGN POINT OF RCP

(Maximum Flow Limit or Upper Flow Limit)는 강도가 가장 낮은 값을 가지는 원자로 내장품의 하중제한치(Load Limit)에 의해서 결정되어진다. RCP의 최대유량은 계통저항곡선이 최소가 되는 발전소의 수명초기(Beginning of Life, BOL)에 발생될 것이므로 RCP의 정격유량 즉 설계유량(Design Flow)은 유량측정오차를 포함하여 BOL시에 최대유량제한치를 초과하지 않고 동시에 수명말기(End of Life, EOL)시에 열설계유량 즉 Q_D이상의 값을 가지는 범위내에 있어야 함을 알 수 있다.

RCP의 정격유량을 결정하기 위해서는 우선 냉각재가 RCS 내부를 유동함에 의해 발생되는 계통저항곡선을 먼저 구해야 하는데 (1) 핵연료가 장전되기 이전, (2) 핵연료가 장전되고 노심에 이물질의 축적(Core Crudding) 및 SG의 관막음(Plugging)이 전혀 되지 않은 전출력 운전상태(BOL), 그리고 (3) 핵연료가 장전되고 노심에 최대의 이물질이 축적되어 2 psid에 해당하는 저항을 발생시키고 SG의 전열관들 중에서 8%가 관막음된 전출력 운전상태(EOL)의 세가지에 대한 계통저항곡선을 구하면 발전소 전수명기간에 대한 모든 운전조건을 포함할 수 있다.

영광 3, 4호기의 원자로는 ABB - CE사의 SYS 80형 원자로를 참조원형으로 채택했지만 열출력을 SYS 80형 대비 약 25% 정도 감소시켰으며 따라서 원자로의 크기와 냉각재의 유량도 이에 대응하여 축소되었다. Table 1은 이와 같은 영향을 고려한 상기의 세가지 운전조건에 대한 RCS의 1차계통(Primary System)내 주요기기들의 압력강하를 보여주는 자료로서 미국 Chattanooga에 소재하고 있는 ABB - CE사의 제작부서로 부터 제공된 것이다.

Figure 2는 영광 3, 4호기 RCP의 정격유량 및 정격수두를 어떻게 결정했는지를 설명하기 위한 것으로서 수두 -유량곡선의 기울기는 ABB - CE사의 3817 MWt급 SYS 80형 원자력발전소에 공급되었던 RCP의 평균기울기를 그대로 채택하였다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 RCP의 유량상한치

TABLE 1 PRESSURE DROP DATA OF MAIN COMPONENTS IN RCS PRIMARY SYSTEM

FLOWRATE PER RCP : 103%OFQ_D
SUCTION TEMPERATURE : 564.5°F
TOTAL FLOWRATE IN RCS : Q_{TOTAL}=340000gpm

	COMPONENT	BEST ESTIMATE PRESSURE DROP, psid		
		PRE - CORE & NO POWER	POST - CORE, FULL POWER & NO SG U - TUBE PLUGGING	POST - CORE, FULL POWER & 8% SG U - TUBE PLUGGING
1	Reactor Vessel (Excluded Core)	34.2	35.8	35.8
2	Core Region	1.5	17.1	17.1
3	Core Crudding (2 psid at 100% Q_D)	0.0	0.0	2.1
4	Hot Leg	1.1	1.2	1.2
5	SG	32.3	34.0	40.0
6	Suction Leg	4.1	4.1	4.1
7	Cold Leg	1.6	1.6	1.6
	TOTAL in psid	74.8	93.8	101.9
	TOTAL in ft	234.7	294.5	319.9

(Upper Flow Limit)는 Q_D의 110%로 제한했는데 이는 ABB-CE사가 설계한 미국의 Arkansas에 소재하고 있는 ANO-2 원자력발전소의 운전경험을 토대로 하여 결정된 값이다.

이제 Figure 2와 같은 수두-유량곡선도에서 영광 3, 4호기용 RCP의 설계점을 결정하는 경우에 대해서 생각해보자. 우선 계통설계자는 Table 1로 부터 발전소의 EOL시 전출력상태에서 Q_D의 100%에 대한 계통저항곡선의 최대치가 약 319.9 ft이므로 이 값에 약 6%의 여유치를 부여한 340 ft의 수두를 나타내는 Figure 2의 점(1)과 유량상한치 110%에서 유량측정오차 3.5%를 고려한 106.5%의 유량과 EOL시의 계통저항곡선과의 교차점인 점(3)을 연결하는 회전차직경 D1의 수두-유량곡선을 선정하여 RCP의 설계점을 Q_D의 100% 즉 82500 gpm에서 340 ft로 결정할 수 있다.

만일 계통설계자가 이와 같이 RCP의 설계점을 Q_D의 100% 즉 82500 gpm에서 340 ft로 결정한 경우 RCS에서 발생되는 실제의 계통저항곡선이 최적의 평가방법으로 구한 Figure 2에 보인 계통저항곡선들과 동일하다면 RCP는 BOL시 점(3)에서 운전되므로 Q_D의 106.5%를 초과하지 않으며 유량측정오차 3.5%를 고려한다 할지라도 실제로 110% 이상의 유량을 송출하지 않으므로 유량상한치를 만족시키며 EOL시에도 점(2)에서 운전되므로 유량측정오차 3.5%를 고려해도 Q_D의 100% 이상이 실제로 송출되고 있으므로 노심냉각을 위한 최소유량을 만족시키고 있다. 그러나 Figure 2에 보인 계통저항곡선은 실측자료로 부터 구한 것이 아니고 최적평가를 토대로 구해진 것이기 때문에 BOL시와 EOL시의 실제의 RCS 계통저항곡선이 수두-유량곡선도상의 점선으로 표현되어진 A 및 B와 같이 최적평가에 의한 계통저항곡선들보다 상승하게 되면 RCP의 운전점은 각각 (a)와 (b)가 된다. 이와 같은 경우 EOL시에 RCP는 점(b)에서 운전되기 때문에 유량측정오차 3.5%를 고려하게 되면 최소유량인 100%의 Q_D를 만족시키지 못할 수도 있으므로 이런 문제점들을 미연에 방지하기 위해서 계통저항곡선에 불확실성(Uncertainty)을 추가하여 RCP의 설계점을 보수적으로 선정할 필요가 있다. 즉 RCP의 수두-유량에 여유를 주기 위해서 설계점을 약간 상승시킬 필요가 있다.

크기 즉 직경은 다르지만 형상이 동일한 일련의 회전차를 사용하여 원심펌프의 수두-유량을 측정하면 회전차의 직경을 증가시킬수록 수두와 유량이 증가되어 원심펌프의 수두-유량곡선이 수두유량곡선도상에서 상방향으로 평행이동되어진다. Figure 2의 D2, D3, D4로 표시된 곡선은 각각 RCP에 D1 회전차를 적용한 경우의 수두-유량보다 5%, 7.5% 및 10%의 여유를 가지도록 D1 회전차보다 직경이 큰 일련의 회전차를 적용한 경우 RCP로 부터 얻을 수 있는 수두-유량곡선을 나타내는 것이다. 물론 RCP의 설계점을 상승시키면 발전소의 시운전(Start-up) 시험시 유량상한치를 초과할 수도 있지만 이와 같은 경우에는 회전차의 외경을 감소시켜 즉 회전차를 깍아냄(Trimming)으로서 요구되는 만큼의 수두-유량특성을 얻을 수 있으므로 계통설계자의 입장에서는 RCP에 최초 요구되는 설계점에서의 수두-유량보다 약간 상승시킨 점에서의 수두-유량을 설계점으로 선정하는 것이 유리하다.

지금까지의 설명과 같은 이유로 영광 3, 4호기 RCP의 설계점은 345 ft의 정격수두에서 103.5%의 Q_D 즉 정격유량을 85400 gpm으로 결정하였으며 Figure 3은 이를 보이는 것이다. 그리고 이 그래프상에 점선으로 표시된 곡선 (1)과 (2)는 각각 계통저항곡선을 평가하기 위해 사용한 압력강하자료들에 포함된 오차들을 고려할 경우 RCS 전유동경로에서 실제로 발생할 수도 있는 최대 및 최소의 계

통저항곡선을 나타내는 것이다. 만일 시운전 결과들로 부터 BOL시에 실제의 RCS 계통저항곡선이 점선(2)와 같을 것이라고 판단되고 따라서 RCP가 점(a)에서 운전된다면 이는 유량상한치를 초과하게 되므로 핵연료에 손상을 입힐 가능성이 존재하게 된다. 이와 같은 경우 RCP의 수두－유량특성은 위에서 설명한 트리밍(Trimming)에 의해서 회전차의 외경을 감소시킴으로서 RCP의 운전점이 운전범위내에 들어오도록 수정할 수 있다.

2.3 수두－유량곡선의 최소허용기울기

2.2절에서 설명한 바와 같이 RCP로 부터의 송출유량은 유량측정오차 3.5%를 고려하는 경우 핵연료의 적절한 냉각을 보장하기 위해서는 최소 Q_D의 103.5% 이하로 감소해서는 안되며 유동유발진동에 의한 원자로 내장품의 파손을 방지하기 위해서는 최대 106.5% 이상을 초과하면 안되므로 RCP의 운전점은 발전소의 전수명기간에 걸쳐서 Figure 4의 운전범위(Operating Range)로 표시한 Q_D의 103.5%에서 106.5%의 영역내에 있어야 한다. 핵연료를 장전한 이후에 RCP의 유량은 BOL시에 최대이며 EOL시에 최소이므로 RCP의 수두－유량곡선은 최소한 BOL시에 QD의 106.5%의 유량에 대한 계통저항을 만족시켜야 하고 EOL시에 Q_D의 103.5%의 유량에 대한 계통저항을 만족시켜야만 한다. BOL시 Q_D의 106.5%의 유량이 흐르는 경우 Table 1에 보인 것과 같은 RCS의 1차계통에 포함되는 각 기기들에서 발생하는 압력강하의 전체 합은 수두로 323.5 ft이며 EOL시 Q_D의 106.5%의 유량이 흐르는 경우에는 315 ft이다. 따라서 RCP의 수두－유량곡선은 최소한 다음과 같은 조건을 만족시킬 수 있는 특성을 가져야 한다.

<u>AT BOL</u>

Flow Path Condition	: Post－Core, No SG Tube Plugging, Crean Core
Target Flowrate	: 106.5% of Q_D
Minimum Required Head	: 315 ft

<u>AT EOL</u>

Flow Path Condition	: Post－Core, 8% SG Tube Plugging, Crean Core
Target Flowrate	: 103.5% of QD
Minimum Required Head	: 323.5 ft

상기의 조건들로 부터 RCP 수두－유량곡선의 최소허용기울기에 대한 요건이 구해지는데 이는 Figure 4를 참조하면 쉽게 이해할 수 있다. 상기 BOL의 조건은 Figure 4의 점 (1)에 해당되며 EOL의 조건은 점(2)에 해당되며 따라서 RCP의 수두－유량곡선 기울기의 절대값은 최소한 이들 두점을 지나는 선(A)보다는 커야한다. Figure 4에서 알 수 있듯이 선(A)보다 기울기의 절대값이 적은 선(C)와 같은 기울기가 RCP의 수두－유량곡선으로 선정되면 BOL시에 RCP의 운전점은 점(a)가 되며 이와 같은 경우 운전점을 운전범위내에 위치시키기 위해서 회전차의 직경을 변화시킨다고 할지라도 RCP의 수두－유량특성은 2.2절에서 설명한 것과 같이 선(C)와 평행하게 이동되므로 여전히 운전범위를 벗어나게 된다. 그러나 선(A)보다 기울기의 절대값이 큰 선(B)와 같은 기울기가 RCP의 수두－

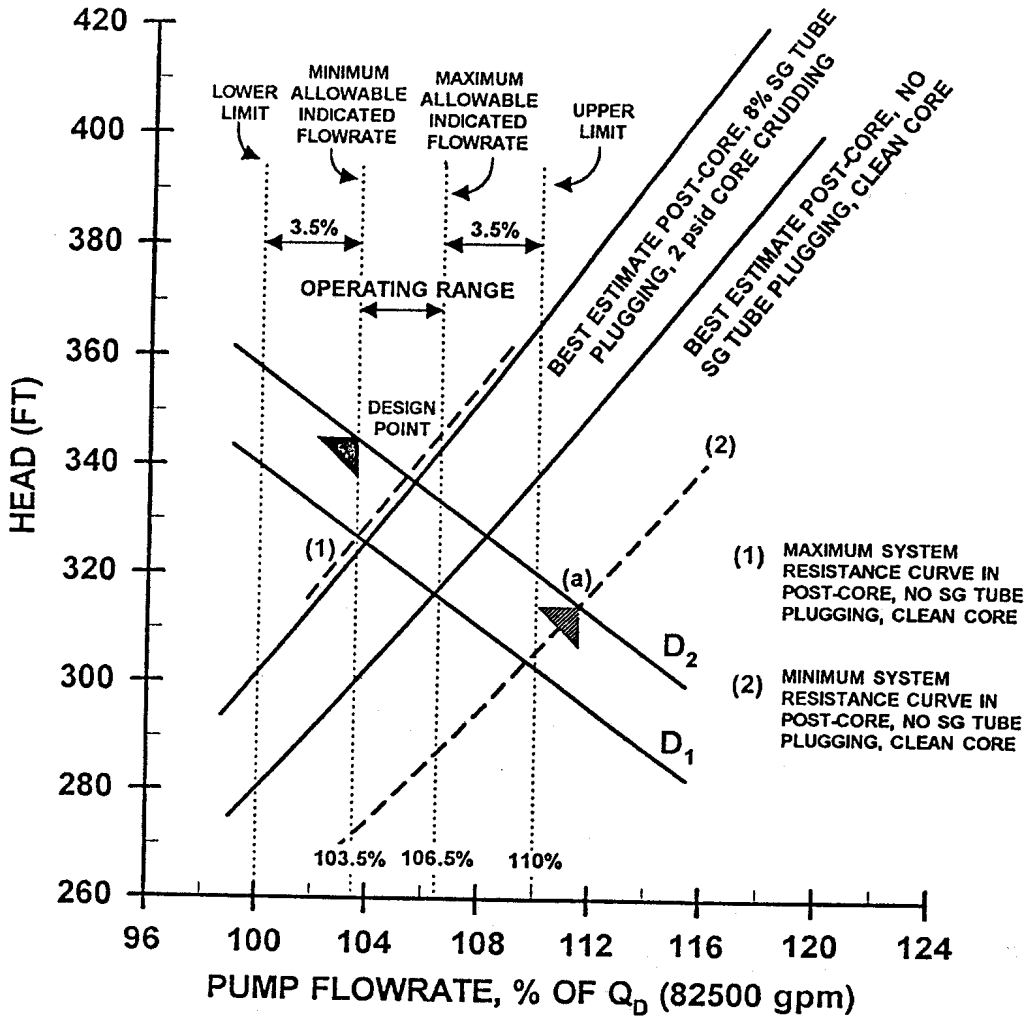


FIGURE 3 DESIGN POINT OF YGN UNIT 3&4 RCP

유량곡선으로 선정되면 BOL시에도 RCP의 운전점은 점(b)가 되어 운전영역내에 위치하게 되므로 이와 같은 경우에는 RCP의 수두 -유량곡선의 기울기로서 만족스럽게 채택할 수 있다. 따라서 RCP의 수두 -유량곡선의 기울기의 절대값 최소허용치는 다음과 같이 구해진다.

$$m = \frac{H_{BOL} - H_{EOL}}{106.5\% \, of \, Q_D - 103.5\% \, of \, Q_D} \tag{2.1}$$

상식의 수두값에 $H_{BOL}=315\,ft$ 및 $H_{EOL}=323.5\,ft$를 대입하면,

$$m = \frac{8.5\,ft}{3\% \, of \, Q_D}$$

상식 분모는 2475 *gpm*이며 이를 정격유량 Q_{rated}=85400 gpm의 백분율(Percentage)로 나타내면 Qrated의 2.9%에 해당되므로,

$$m = \frac{8.5\,ft}{2.9\%\ \text{of}\ Q_{rated}} = -\frac{2.93\,ft}{\%\ \text{of}\ Q_{rated}}$$

$$|\,m\,| = \frac{2.93\,ft}{\%\ \text{of}\ Q_{rated}} \qquad (2.2)$$

식(2.2)로 주어지는 기울기는 RCP가 발전소의 전수명기간에 걸쳐서 운전영역내에 운전될 수 있도록 보장해주는 수두 - 유량곡선의 기울기를 나타내며 영광 3, 4호기의 경우 식(2.2)로 주어지는 요건에 약 20% 정도의 여유를 고려하여 RCP 수두 - 유량곡선의 최소허용기울기를 다음과 같이 결정하였다.

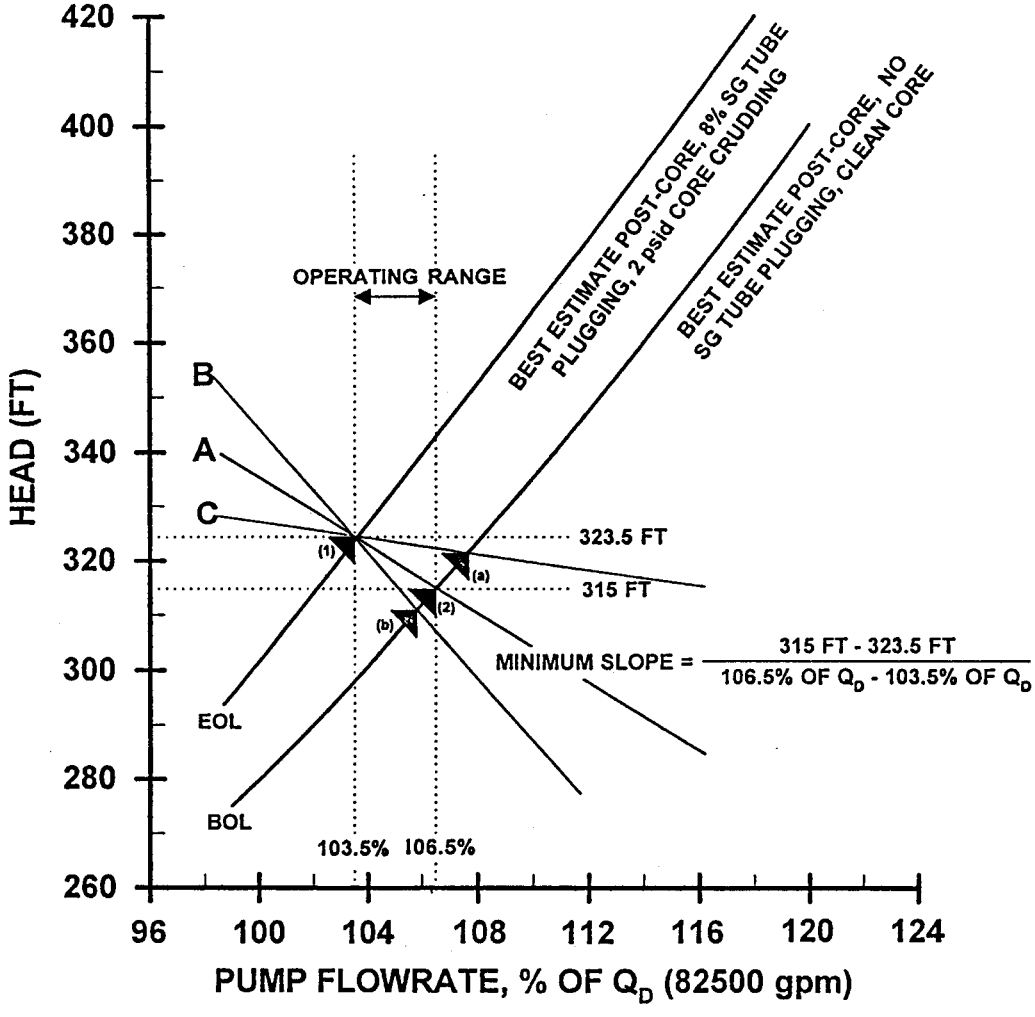


FIGURE 4 MINIMUM ALLOWABLE SLOPE OF YGN UNIT 3 & 4 RCP H - Q CURVE

$$|m| = \frac{3.55\,ft}{\%\ \text{of}\ Q_{rated}} \tag{2.3}$$

2.4 최소가변수두

2.2절과 2.3절의 내용으로 부터 원심펌프의 수두-유량곡선은 회전차의 직경을 변화시킴으로서 평행이동되며 가변수두(Correctable Head)란 이와 같이 회전차의 직경을 감소시키거나 증가시킴에 의해서 변화시킬 수 있는 원심펌프의 수두를 의미한다. 참고로 회전차 직경의 일정비율 이상으로 트리밍할 수 없는데 이는 과도하게 트리밍하여 회전차의 직경을 줄이면 날카롭게 가공되어진 회전차 날개의 끝단부가 상당량 잘려나가게 되어 수력학적인 손실이 증가되어 최초의 수두-유량곡선의 기울기를 유지할 수 없기 때문이다. 그리고 이를 보완하기 위해서 날개 끝단부를 가공하게 되면 회전차의 출구각이 변화되기 때문에 최초의 기울기는 유지되지 않는다. 따라서 가변수두의 최대값은 펌프의 케이싱에 장착할 수 있는 최대직경의 회전차에 의해서 결정되며 최소값은 수두-유량곡선의 기울기를 변화시키지 않고 트리밍할 수 있는 회전차의 최소직경에 의해서 결정된다[(3),(4)].

최소가변수두란 말 그대로 회전차의 외경을 변화시킴으로서 얻어지는 수두-유량곡선의 변화로부터 펌프가 유지해야 하는 최소수두를 의미하는데 이는 2.2절의 끝부분에서 설명한 바와 같이 핵연료를 장전하기 전에 수행한 발전소의 시운전 결과 BOL시의 계통저항곡선이 Figure 3의 점선(2)와 같을 것이라고 판단되고 따라서 펌프의 운전점이 점(a)가 되어 유량상한치를 초과하게 되는 경우 펌프의 운전점을 운전범위내로 이동시키기 위해서 필요한 요건이다. 최소가변수두요건의 필요성은 Figure 5를 참조하면 다음과 같이 쉽게 이해할 수 있다.

BOL시의 계통저항수두가 Figure 5의 점선(2)와 같다면 RCP는 정격유량 85400 gpm, 정격수두 345ft 그리고 식(2.3)의 기울기를 가지도록 제작되었기 때문에 RCP의 수두-유량곡선은 D2가 되고 따라서 BOL시의 운전점은 계통저항곡선과 수두-유량곡선 D_2의 교차점인 점(a)가 되어 313.0ft의 수두로 Q_D의 111.7%의 유량을 송출하기 때문에 RCP는 운전범위를 벗어난 영역에서 운전된다. 이런 상황이 발생되면 과도한 유량이 원자로를 통과하므로 노심 및 원자로 내부구조물의 건전성을 보장하기 어려워지므로 회전차의 직경을 감소시켜 운전점을 점(b)로 이동시켜야 한다. 즉 트리밍을 수행하여 RCP의 수두-유량곡선을 선D_2로 부터 선D_0로 평행이동시켜 최대의 송출유량이 Q_D의 106.5% 이하가 되도록 해야 한다.

회전차를 트리밍한 후 RCP의 수두-유량곡선이 D_0이고 만일 D_0의 기울기가 5%의 여유를 가지도록 설계된 회전차에 의한 수두-유량곡선 D_2와 동일하다면 최소유량요건인 Q_D의 103.5%의 유량을 송출하는 경우 펌프의 운전점은 Figure 5의 점(c)가 되고 이 경우 토출수두는 297ft이므로 RCP의 회전차는 트리밍 이후에도 적어도 103.5%의 유량에서 297ft 이상의 토출수두를 발휘할 수 있는 특성을 가지는 것이라야 한다. 따라서 RCP의 최소가변수두는 Q_D의 103.5%의 유량에서 297ft로 결정된다.

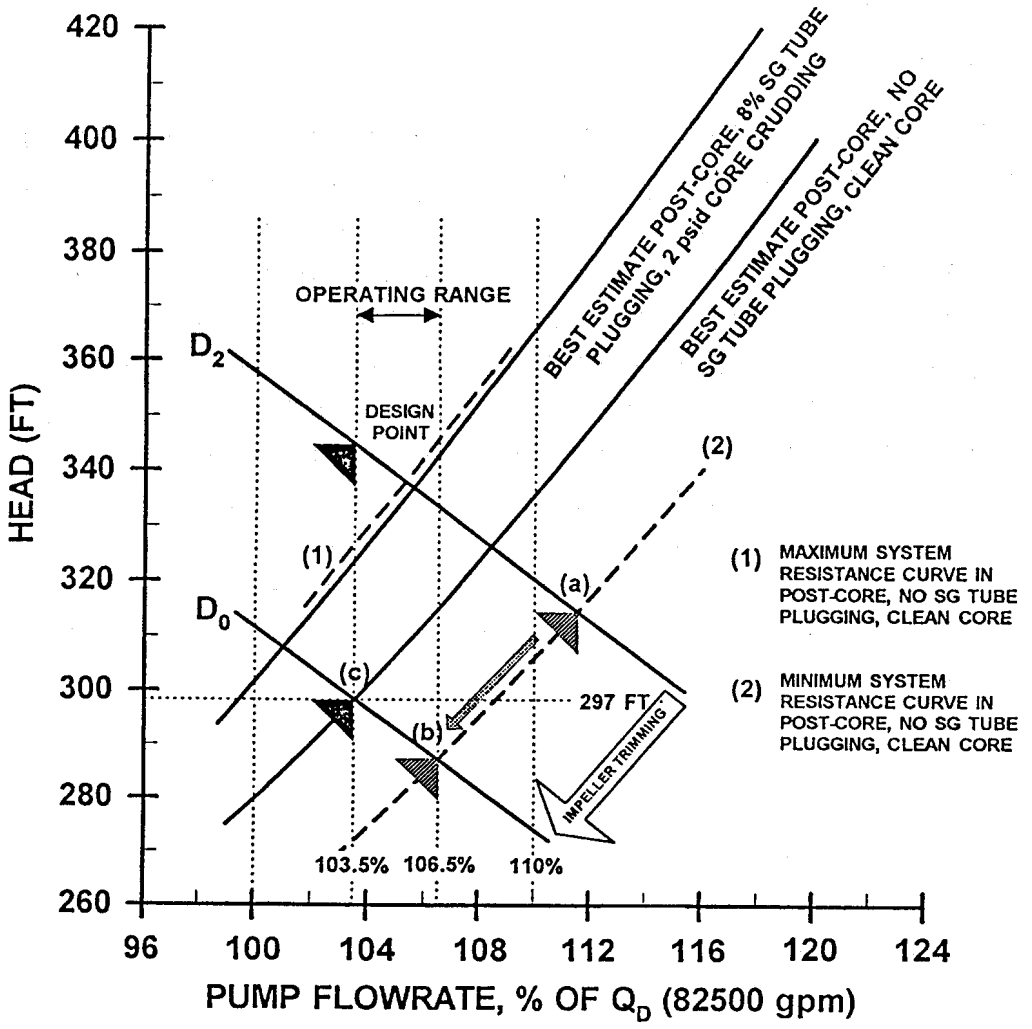


FIGURE 5 MINIMUM CORRECTABLE HEAD OF YGN UNIT 3 & 4 RCP

3.0 결론

지금까지 논의된 2장의 내용은 원자로냉각재의 만족스러운 운전을 보장하기 위해 계통설계자가 결정하고 펌프제작자에게 요구해야 하는 RCP에 대한 최소한의 설계요건들이다. 현재의 원자력발전소 설계과정에 의하면 우선 계통설계자는 이 설계요건들을 참고문헌 (2)을 통해서 기기 설계자에게 제공하여 기기설계자로 하여금 이 요건들을 토대로 하여 기기사양서(Component Specification)를 작성할 수 있도록 하여야 한다. 기기사양서는 기기설계자가 계통설계자로 부터 제공받은 기본적인 설계요건들(Basic Design Requirements) 외에 기계적인 하중요건 혹은 내진요건 등과 같은 기타의

상세설계요건들(Detail Design Requirements)을 첨가하여 RCP 공급업체로 선정된 펌프제작자에게 제공하는 설계문서이며, 펌프제작자는 기기사양서에서 요구하는 특성을 만족시킬 수 있는 RCP를 공급해야만 한다. 영광 3, 4호기용 RCP의 기기사양서에 명시된 RCP의 중요한 설계요건들을 요약하면 다음과 같다.

Design Pressure (Pressure Retaining Part)	: 2500 psia
Design Temperature (Pressure Retaining Part)	: 650 °F
Inlet(Suction) Size	: 30 inches I.D
Outlet(Discharge) Size	: 30 inches I.D
Rated Flow(Qrated)	: 85400 gpm*
Rated Head(Hrated)	: 345 ft
RCP Flow Range @ Full Power	: $Q_D = 82500 gpm < Q < 1.1 \times Q_D = 90750\ gpm$
Range for RCP Head	: **
Absolute Value of H – Q Curve Slope	: $\lvert m \rvert > \frac{3.55\ \text{ft}}{\%\ \text{of}\ Q_{rated}}$

* Qrated is 103.5% of RCS thermal design flowrate (Q_D), where Q_D is 82500 gpm.

** The pump design shall be provide the capablity for the possible downward vertical movement of H – Q curve to pass through the pump head of 297 ft at the rated flow.

참 고 문 서

1. Korea Electric Power Corporation, "Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 3 & 4 Final Safety Analysis Report", 1992.
2. ABB – Combustion Engineering Inc., "Design Requirements for the Reactor Coolant System Components for Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 3 & 4(10487 – FS – DR210 – C, DDS – 1, Rev.04), 1994.01.28.
3. A. J. Stefanoff, "Centrifugal and Axial Flow Pumps (2nd Ed.)", John Wiley & Sons Inc., 1957.
4. 하재현, 손병진, 김춘식, "유체기계", 대학도서, 1986.
5. Philip M. Gehart & Richard J. Gross, "Foundamentals of Fluid Mechanics", Addison – Wesley Publishing Co., 1985.
6. 김경근, 김춘식, 손경호, 송강섭, "수력학 및 유체역학연습", 태화출판사, 1986