



기술현황분석보고서

칼리머 냉각재 순환펌프 형식 타당성 분석

Feasibility Study on the Type of KALIMER

Coolant Circulation Pump

한국원자력연구소

29-41

3

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 기술현황분석보고서로 제출합니다.

1997년 7월

과 제 명 : 액체금속로냉각재기술개발

주 저 자 : 김 용 균

공 저 자 : 남 호 윤

이 용 범

황 종 선

최 석 기

감수위원 : 조 만

요 약 문

액체금속로의 노형 선택, 원자로의 경제성, 신뢰성 등에 많은 영향을 주는 냉각재 순환 펌프 설계 개념으로서 기계식 펌프와 전자식 펌프의 특성을 비교 검토하였다. 활용 경험이 풍부한 기계식 펌프는 개발 노형의 신뢰성을 만족시킬 수 있으나 부피와 무게가 크고 개발 가능성이 낮아 KALIMER의 개발 목표인 경제성 있는 액체금속로를 달성하기는 어려울 것이다. 대용량의 전자식 펌프는 아직 검증되지 않은 실정이나 조만간 실증될 것으로 예상되며, 전자식 펌프를 채용하면 개발에 대한 부담은 있지만 기계식 펌프에 비해 규격이 작아 원자로를 조밀화시킬 수 있으므로 액체금속로의 경제성을 제고시키는 한 방법이 된다. 또한 전자식 펌프는 전자석 코일의 배치에 따라 여러 모양으로 바꿀 수 있으므로 액체금속로 개발 과정에서 신 노형 개발이나 독자 노형을 개발하기가 용이하다. 그러므로 경제적인 액체금속로 개발이라는 측면에서 보면 전자식 펌프를 채용하는 것이 바람직하다.

SUMMARY

The characteristics of mechanical pump and electromagnetic(EM) pump for liquid sodium coolant in a liquid metal reactor are compared and analysed as a design concept of KALIMER coolant pumps. The type of coolant circulation pump affects the selection of reactor type, economics, and reliability of reactor. Though the mechanical pump has much application experience and give satisfaction to the reliability of developed reactor type, the possibility of development is limited and its large weight and volume have a negative effect on the design of the economical liquid metal reactor. The large scale electromagnetic pump has not been verified yet, but it is expected to be demonstrated in time. Because the size of EM pump is small relative to the mechanical pump, the compact reactor design is possible. Therefore the selection of EM pump can be one of the methods to improve the economics. Since the shape of EM pump can be varied according to the arrangement of electromagnet coils, a new or unique reactor type can be developed easily in the process of KALIMER development. In the view point of economic LMR development, it is desirable to adopt the electromagnetic pump.

목 차

1. 서 론	1
1.1 배경 및 목적	1
1.2 액체금속로에서 구동펌프의 기능 및 구비조건	2
1.3 세계적 현황	3
2. 비교 평가 설계 개념	17
2.1 기계식 펌프	17
2.2 전자식 펌프	20
3. 타당성 평가	53
3.1 기능성	53
3.2 운전성	56
3.3 안전성	58
3.4 제작성	64
3.5 정비성	66
3.6 경제성	66
3.7 종합	68
4. 결 론	70
참 고 문 헌	71

표 목 차

표 1. PRISM 노심의 유동경로에서 발생하는 압력강하(기압)	4
표 2. 세계 각국의 액체금속 원형실중로의 냉각재 순환펌프 특성	5
표 3. 전자식 펌프의 성능에 영향을 미치는 기하학적 변수	27
표 4. 펌프 동작 특성에 미치는 설계 변수들의 영향	28
표 5. 고순도 구리의 중성자 조사에 의한 특성 변화	44
표 6. 석출 강화동의 중성자 조사에 의한 특성 변화	45
표 7. 알루미늄 분산 강화동의 중성자 조사의 특성 변화	47
표 8. ALMR 1차 소듐 전자식 펌프의 parameter	54
표 9. 노형별 주냉각펌프 비교	55
표 10. Busbar Cost Reduction for EM pump	67
표 11. 기계식 펌프와 전자식 펌프의 비교 검토	69

그 립 목 차

그림 1. ALMR 2차 열전달 계통의 펌프와 모터	6
그림 2. ALMR 2차 열전달 계통의 펌프 성능	9
그림 3. ALMR 2차 펌프의 shaft seal oil과 커버가스 계통도	10
그림 4. PRISM의 1차 전자식 펌프	13
그림 5. MDP형 LMR의 1차 전자식 펌프 설계제원	14
그림 6. 기계식 원심펌프의 구조도	19
그림 7. 직류 전도형 전자식 펌프	22
그림 8. 환단면 선형 유도형 전자식 펌프	24
그림 9. 평판 선형 유도형 전자식 펌프	25
그림 10. 방향성 규소 강판의 여러 온도에서의 유도 자속 밀도	30
그림 11. 방향성 규소 강판의 여러 온도에서의 상대 투자율	31
그림 12. 온도에 따른 최대 유도 자속 밀도의 변화	33
그림 13. 온도에 따른 최대 상대 투자율의 변화	34
그림 14. 철심 재료의 Coercive force에 대한 중성자 조사의 영향	36
그림 15. 철심 재료의 최대 상대 투자율에 대한 중성자 조사의 영향	37
그림 16. 고순도 구리(411~430℃와 529℃)와 Cu-5wt%Ni(430℃)의 FFTF 중성자 조사에서의 Swelling과 전기 전도도의 변화	41
그림 17. 산화 분산 강화동의 전기 전도도에 대한 중성자 조사의 영향	42
그림 18. 411~414℃에서 중성자 조사된 MZC Copper Alloy의 Swelling, 전기 전도도, Tensile Strength	43
그림 19. 산화 분산 강화동의 중성자 조사에 대한 Swelling의 영향	49
그림 20. Synchronous Coastdown Machine의 개념도	57
그림 21. 전자식 펌프 전원공급계통 및 Coastdown Performance	59
그림 22. Coastdown이 일어날 때 전자식 펌프의 특성	60
그림 23. Unprotected Loss of Flow and IHTS Heat Sink, Coastdown on Four EM Pumps: Power and Flow	62
그림 24. Unprotected Loss of Flow and IHTS Heat Sink, Coastdown on Three EM Pumps: Power and Flow	63

1. 서 론

1.1 배경 및 목적

프랑스의 액체금속로인 Super-Phenix를 통한 기술적인 검증과 미국의 실험로인 EBR-II을 통하여 액체금속로의 고유안전성을 이미 실험적으로 입증하였으나 액체금속로는 경제성 문제로 인하여 상업로로서의 역할을 하지 못하고 있다. 그러므로 고유안전성과 더불어 경제성을 확보하여 경수로와 같은 수준의 건설비를 목표로 액체금속로를 상용화하려는 개발 계획들이 각국에서 시도된 바 있다. 경수로와는 달리 액체금속로에는 소듐을 냉각재로 사용하고 있다. 소듐은 열유체로서의 여러가지 장점을 갖고 있으며 이는 경제성 향상에 활용되고 있다. 소듐은 유체적 특성이 물과 많이 다르지 않기 때문에 액체금속로의 1차측 소듐 냉각재의 구동용으로는 경수로의 경우에서와 같이 오랜 경험이 있는 기계식 펌프(Mechanical Pump)를 사용하고 있었다. 80년대 초부터는 경제성 관점에서 전자식 펌프(Electromagnetic Pump)를 1차측 소듐계통에 사용하고자하는 새로운 시도들이 있었다. 전자식 펌프는 액체금속로의 냉각재인 소듐이 높은 전기전도도를 갖는 성질을 이용한 것으로 액체금속로 개발 초기부터 거의 모든 소듐 배관에 설치하여 사용되고 있었다.

소듐 순환계통에 필수적인 순환펌프를 어떠한 방식으로 선택하느냐에 따라 노형개념과 경제성 면에서 개발계획에 큰 영향을 끼친다. 전자식 펌프가 갖는 여러 가지 장점으로 인하여 오래동안 소듐 시설에 사용되고 있으면서도 1차측 소듐 구동용으로 사용되지 못한 이유는 전자석 코일에서 발생하는 열손실과 코일이 고온에서 견디지 못하였기 때문에 코일을 쉽게 냉각 시킬 수 있는 소듐 배관에서만 사용 가능하였기 때문이다. 새로운 코일 재료의 개발과 EBR-II 실험로의 2차 소듐 순환계에 전자식 펌프를 사용하여 성공을 거둔 이후로 대용량 전자식 펌프 개발에서도 획기적인 발전이 이루어졌다. 최근에는 혁신개념의 액체금속로 설계에서 대부분 전자식 펌프를 1, 2차 냉각재 순환펌프로 채택하였고, 소형화되고 모듈화된 설계개념이 각광을 받게됨에 따라 실용화의 가능성도 높아지고 있다. 문헌에 의하면 전자식 펌프를 사용하면 자체 경제성

뿐만 아니라 플형 원자로에 침지식으로 설치하면 소듐 냉각재 순환계의 규모를 단순화시켜 액체금속로를 경제적으로 만들 수 있으므로 실용로로서의 가능성을 높힐 수 있다고 하였다.[1-3]

대용량의 기계식 펌프는 약간의 성능 보완은 필요하나 기술적으로 거의 완성되었고 오랜 사용 경험이 있으나 대용량으로 원자로 풀에 설치하는 침지형 전자식 펌프는 개발은 완료되었으나 원자로 운전상태와 같은 온도조건과 내방사선 조건에서 아직 검증되지 못하였으므로 실용화되지 못한 상태에 있으며 전자식 코일의 건전성 확보와 같이 기술적으로 해결해야 할 문제가 아직 남아 있는 상태이다.

이에 따라 이 보고서에서는 KALIMER에 채용될 냉각재 순환펌프의 형식에 대한 타당성을 평가하고 그 자료를 제시함으로써 앞으로의 개발방향을 설정하는데 목적이 있다. 개발단계에 있는 전자식 펌프에 대해서는 비교적 자세히 기술하였으나 오랜 운전 경험이 있는 기계식 펌프에 대해서는 간단히 기술하였고, 전자식 펌프와 비교하는데 중점을 두어 기술하였다.

1.2 액체금속로에서 구동펌프의 기능 및 구비조건

액체금속로에서 냉각재 순환펌프가 구비하여야 되는 기능은 경수로 등의 다른 원자로에서와 동일하지만 특수 조건으로는 설계압력이 경수로보다 매우 낮은 10기압이고 설계온도가 600℃로 경수로 보다 매우 높다. 냉각재인 소듐의 유체적 특성은 물과 비슷하지만 다른 물질과 반응성이 높으므로 금속으로는 철, 니켈 등만이 소듐 속에서 안전하며 비금속 원소로서는 불활성 가스가 소듐과 화학 반응이 일어나지 않지만 그중 질소는 500℃ 이상이면 소듐과 반응이 일어난다. 또한 철보다 높은 전기전도도를 갖는다. 액체금속로에서는 냉각재인 소듐이 중성자와의 포획반응에 의하여 ^{24}Na 로 변환된다. ^{24}Na 는 반감기가 14.96시간인 베타붕괴핵종으로서 붕괴하면서 베타선과 감마선을 방출하는 핵적 특성이 있다.

플형 원자로에서의 1차 계통은 원자로 용기 내에 있으며 이때 소듐 냉각재는 순환 펌프에 의하여 원자로 하부 플레넘, 입구 노즐, 노심, 상부 플레넘, IHX의 shell측으로 순환하면서 노심에서 생성된 열을 중간계통으로 전달하는

것을 담당한다. 이 과정에서 표 1에서 보는 바와 같이 전자식 펌프를 사용하는 PRISM 원자로에서는 6.4 기압의 차압이 발생한다. 이 압력강하는 원자로 노형에 따라 약간 변하나 대동 소이하며, 기계식 펌프를 사용하면 노심에서 열전달 효율을 높이기 위하여 더 높힐 수 있다. 그러므로 펌프의 헤드는 8기압 정도로 설계 하고, NPSH는 0.8기압 정도로 설계한다.

1.3 세계적 현황

액체금속로의 냉각재 순환 펌프는 기존의 기계식 원심펌프와 액체금속의 전도성과 전자기력을 이용하여 냉각재를 순환하는 전자식 펌프가 있다. 두가지 설계개념에 대한 상세한 설명은 다음 장에 기술되어 있으며, 여기서는 이러한 개념들이 현재 발전되어 있는 상태와 기존의 원형실증 액체금속로 및 설계개념 액체금속로에서 채택된 현황을 서술하고자 한다. 1, 2차 냉각재 순환 펌프를 세계 각국의 액체금속 원형실증로에서 채용하고 있는 현황을 표 2에 나타내었다.

1.3.1 기계식 펌프

기계식 원심펌프는 기존 경수로에서 1차 냉각계통의 순환 펌프로 많이 사용되고 있으며 액체금속로의 1차 냉각재 순환 펌프로도 많이 사용되고 있어서 펌프의 제작과 운전 경험이 풍부한 장점이 있다. 표 2에 나타난 바와 같이 현재까지 운전 중인 원형로와 실증로는 모두 기계식 원심 펌프를 1차 냉각재 순환 펌프로 채택하고 있다.

대표적인 예로서 프랑스의 Super-Phenix의 1차 냉각재 펌프를 들 수 있는데 Super-Phenix의 경우 실험로 Rapsodie와 실증로 Phenix에서 사용되고 있는 냉각재 순환 펌프와 같은 개념의 펌프로서 그 용량을 확대시킨 것이다. 즉, Rapsodie의 펌프를 7배의 용량으로 확대시킨 것이 Phenix의 펌프이고, Super-Phenix는 Phenix의 용량을 4배 확대한 것으로 볼 수 있다.[5]

미국의 ALMR 설계개념 초기에서는 2차 냉각재 순환 펌프로서 기계식 펌프를 채택하였다가 그 후 전자식 펌프로 변경하였다. 그림 1에 나타낸 것이 이 기계식 펌프의 구조로서 2700 마력의 정속(constant speed) 유도 전동기

표 1. PRISM 노심의 유동경로에서 발생하는 압력강하(기압)

유동경로	정상상태 Full Power	자연순환 scram 1000초 후
(a) Reactor Core And Inlet Module	5.65	0.016
(b) Upper Plenum (Form Core to IHX)	0.014	~ 0
(c) Intermediate Heat Exchangers	0.27	0.0007
(d) Form Lower Plenum to Pump Inlet Manifold	0.14	~ 0
(e) EM Pumps		0.0007
(f) From Pump Discharge Manifold to Core Inlet Plenum	0.33	0.0007
Total	6.39	~ 0.018
Core Flow (ℓ/min)	44.16	~ 1.79

표 2. 세계 각국의 액체금속 원형실증로의 냉각재 순환펌프 특성

Reactor Country	DFR UK	EBR-II USA	PFR UK	PHENIX France	BN-600 USSR	MONJU Japan	SPX-I France
열출력, MWt	60	62.5	600	568	1470	714	3000
1차 열전달계통 형식	Loop	Pool	Pool	Pool	Pool	Loop	Pool
No. Loops	24	1	3	3	3	3	4
Pump Type	전자식	기계식	기계식	기계식	기계식	기계식	기계식
Pump Position	Cold	Cold	Cold	Cold	Cold	Cold	Cold
Total Flow, kg/s	450	481	3090	2760	6050	4260	16,900
2차 열전달 계통							
No. Loops	12	1	3	3	3	3	4
Pump Type	전자식	전자식	기계식	기계식	기계식	기계식	기계식
Pump Position	Cold	Cold	Cold	Cold	Cold	Cold	Cold
Total Flow, kg/s	900	481	2920	2280	5310	3120	13,200

PUMP CHARACTERISTICS

FLOW	41,250 GPM
SODIUM TEMPERATURE	540°F
TOTAL HEAD	80 PSI
AVAILABLE NPSH	52 ft @ 540°F
REQUIRED NPSH	40 ft @ 540°F
PUMP SHAFT POWER	2700 HP
PUMP SPEED	1400 RPM
PUMP MATERIAL	304 AND 316 SST

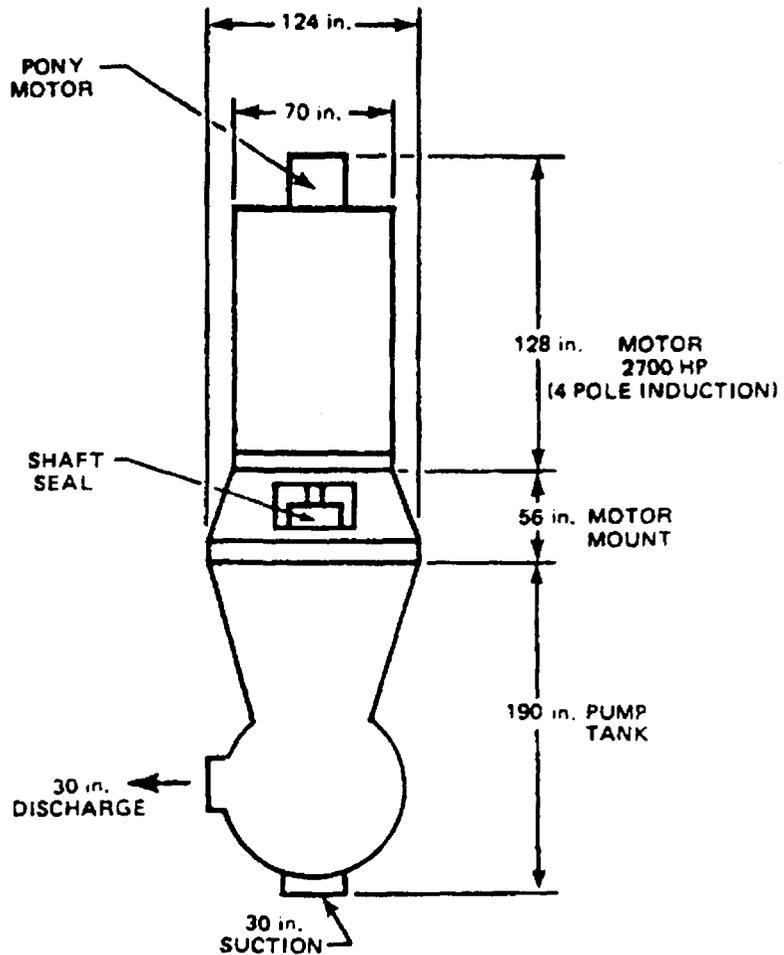


그림 1. ALMR 2차 열전달 계통의 펌프와 모터

(induction motor)로 구동되는 자유액면(free surface) 방식의 기계식 원심 펌프이다. 보조 소형 전동기(pony motor)가 장착되어 있으며, 이 전동기는 잔열 제거, 저출력 또는 대기 상태에서 10% 저유량 운전에 사용한다. 소듐 냉각재와 접촉하는 펌프 부위는 베어링과 특수부분을 제외하면 모두 304SS 또는 316SS로 만들어진다.

ALMR에서 2차 냉각재 순환 펌프와 펌프 구동장치의 설계 및 성능 사양을 그림 1, 2에 나타내었다. ALMR 설계 개념에서 소듐 펌프의 동작 특성은 다음과 같다.

가. 2차 소듐 펌프의 제원은 282℃(540°F), 63m(208ft) static head에서 유량 2602.4 l/sec(41,250gpm)이다.

나. 펌프 구동장치는 2700마력 정속 유도 전동기이다.

다. 6피트의 자유 액면 수위 변화를 수용할 수 있는 용량이 펌프와 팽창 탱크 내부에 준비되어 있어야 한다.

라. Coastdown 때에는 main motor에서 자동전환되어 설계유량의 10%를 흐르게 하는 pony motor가 있어, 연속적인 흐름을 제공한다.

마. pony motor의 보조 전원은 plant gas turbine generator에서 제공된다.

바. 가동 중에 펌프의 수력계통과 소듐탱크 영역 사이에 flow에 대한 impedance가 생긴다. 따라서 펌프 탱크와 팽창 탱크 사이의 수위차가 감소되고, 펌프가 trip되거나 소듐/물 반응이 있을 때 발생할 수 있는 잠재적인 flow oscillation에 대한 완충 역할을 한다. 또한 2차 열전달 계통에서 파이프 파열과 같은 문제가 발생하였을 때 소듐이 펌프의 탱크로부터 급격하게 유출되는 것을 막아준다.

사. 가동시 소듐의 수위를 감시하고 충전 및 배출 작업을 용이하게 할 수 있도록 소듐 수위 탐침(level probe)을 설치한다.

아. 정상 가동시 소듐 수위의 상부에 2인치 노즐을 설치하여 가스관에 연결한다. 이 가스관은 펌프와 2차 열전달 계통의 팽창 탱크 가스 공간을 연결하는 공동가스관으로서 두 탱크의 가스 압력이 같도록 유지하여

준다.

자. 증기발생기의 구조물의 일부분으로 펌프를 지탱하며, 구동 전동기는 펌프의 일부분인 motor mount에 의하여 지지한다. 전동기와 펌프 사이에는 연결부가 있어 펌프의 축과 추진기(impeller)를 전동기와 결합하여 준다. 펌프 축의 축방향 하중과 상부 축의 반경방향 하중은 전동기 베어링에서 지지된다.

차. 펌프 축의 seal과 커버 가스의 구성도를 그림 3에 나타내었다. 이것들은 labyrinth 가스 seal과 결합된 이중 오일 윤활방식의 rotating face seal로 구성된다. 소듐의 윤활유 오염을 방지하기 위하여 기름막이(slinger)와 labyrinth seal의 알곤 가스 정화 장치를 사용한다.

카. 펌프는 주 전동기를 제거하지 않고도 seal의 유지보수와 교환이 가능하도록 설계되어야 한다. 회전축 seal의 보수 간격은 최소한 20,000시간 이상이어야 한다. 펌프 내장물들을 검사하거나 점검할 때 펌프 탱크와 system의 파이프를 다치지 않고 제거 가능하도록 설계한다.

1.3.2 전자식 펌프

전기전도가 높은 액체금속의 수송 방법으로서 1915년경 소련에서 “진행 자장에 의한 액체금속의 이송법”이 제창되었으나 큰 주목을 끌지 못하고 있었지만, 액체금속로의 개발과 더불어 기밀성이 요구되는 액체금속 순환용 펌프로서의 기능을 만족시킬 수 있으면서 구동 부분이 없는 펌프이므로 중요시되어 전자식 펌프의 개발이 지금까지 이어지고 있고 또한 소듐 배관에 대부분 사용되고 있다.[6]

1958년 미국의 Atomic International은 원자로 냉각재 공급용 액체금속 전자식 펌프 개발에 착수하여 10~2000 gpm 정도의 유량율을 갖는 헬리컬 로우터 장착 펌프를 제작 시험한 바 있으며,[7] 일본에서도 1960년대 들어서면서 전자식 펌프 개발에 집중하기 시작하였는데 Toshiba는 1967년부터 1970년대 말에 이르기까지 평판선형 및 환단면형 등 많은 종류의 전자식 펌프를 제작하여 10 l/min에서 최고 10,000 l/min까지의 출력을 얻어낸 바 있다.[8]

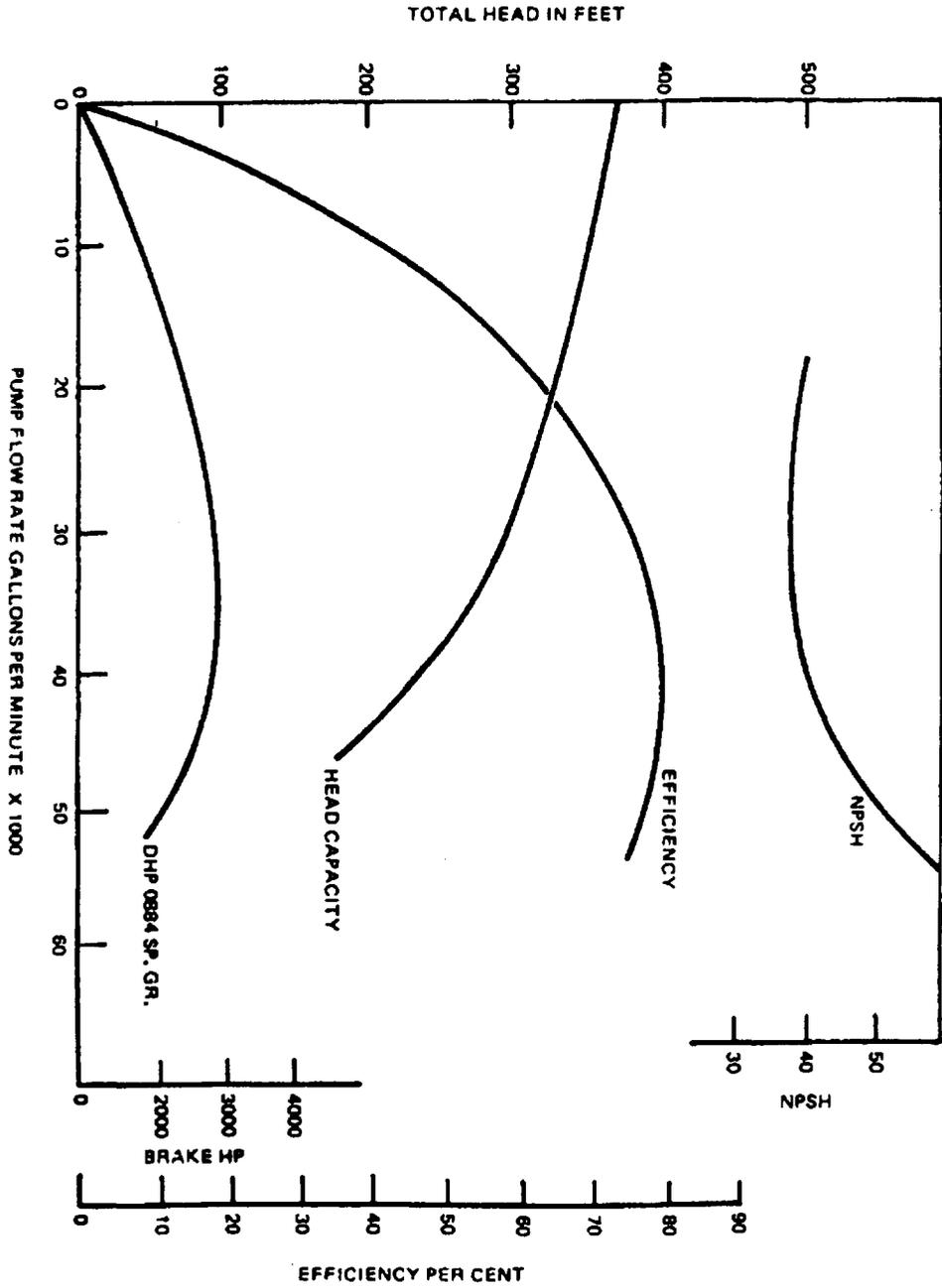
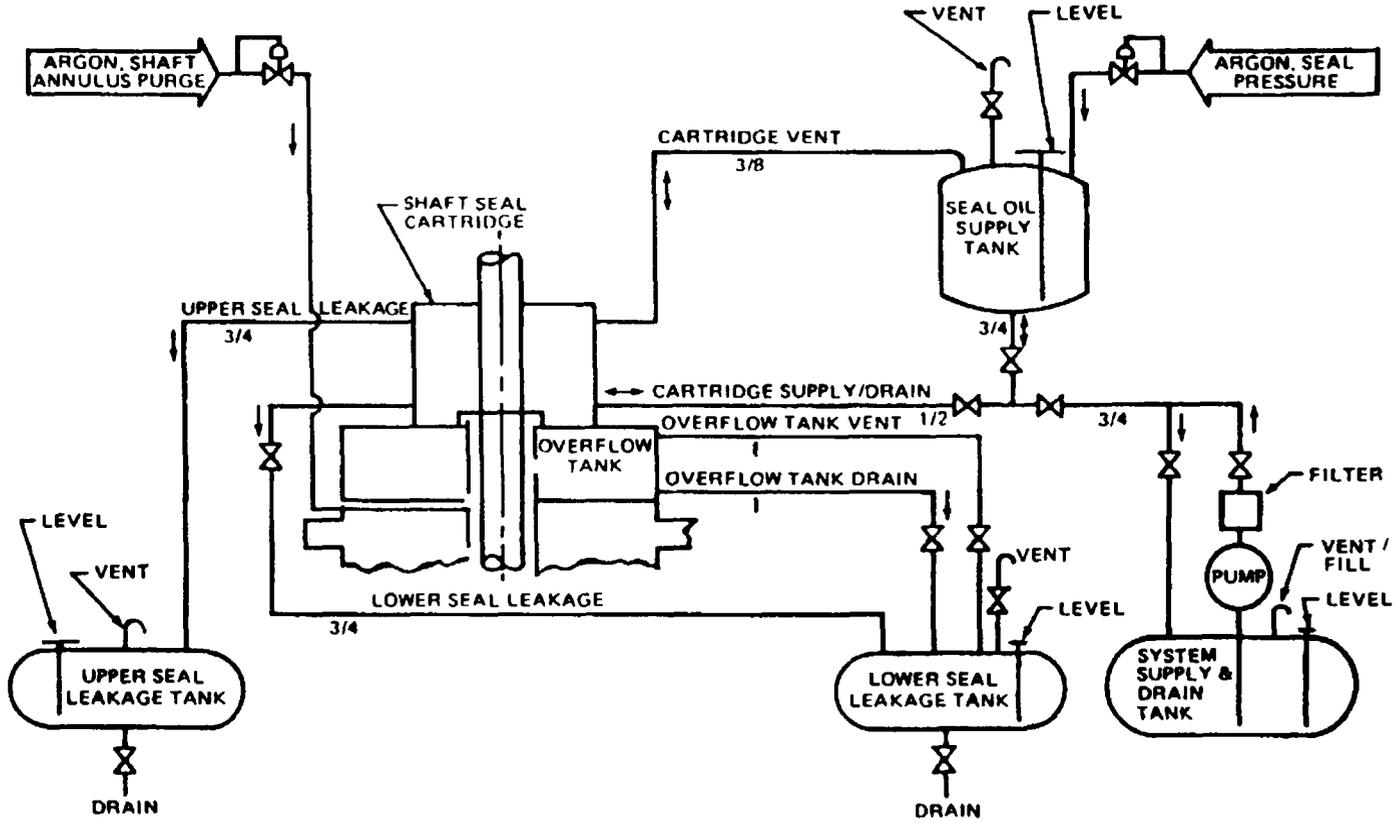


그림 2. ALMR 2차 열전달 계통의 펌프 성능

그림 3. ALMR 2차 펌프의 shaft seal 이파 커버 가스 계통도



미국의 General Electric에서는 1977년에 액체금속 고속증식로에 필요한 중형 전자식 펌프의 요구에 따라 종래 6,500 gpm을 갖는 펌프로부터 14,500 gpm (55,000 l/min)의 펌프를 개발하였는데 펌프 형태는 환단면 선형 유도펌프로써 입구와 출구가 같은 위치에 있어 외부코아 제거가 용이하고, duct와 외부코아 사이의 열팽창 차이를 수용할 수 있는 것이 특징이다.[9,10] 같은 시기에 프랑스의 NOVATOME사에서는 CEA와 기술 교환 협정에 의거하여 전도형, 사각평판 유도형, 환단면 유도형의 3가지 형태의 배관장착용 펌프를 제작하였는데 3상 220V의 전원 입력으로 최소 유량 2m³/hr에서 최고 140m³/hr의 유량을 가지며 특히 고온(600℃)에서 사용할 수 있는 자연대류냉각 또는 강제공기냉각 방식을 채택하여 시판하고 있다.[11-14]

1978년 영국의 Atomic Energy Authority는 일반적인 전자식 펌프에서 제작상 불가피한 magnetic gap을 좀 더 줄여주기 위한 방법으로써 금속으로 차폐시킨 광물 절연 코일 도체를 나선형으로 코아에 감아 직접 액체금속과 접촉하는 방법을 사용하였고, 1982년에는 보다 개량된 헬리컬 펌프를 제작하여, 액체금속이 외부와 내부 파이프 사이로 이루어지는 duct의 유로를 지나가도록 하였다.[15,16] 1982년 일본의 동경공대(TIT)에서는 원통형 단상 유도전자식 펌프의 이론적 해석의 일부로서 펌프 내에서 유기되는 와전류, 체적력 등에 관한 고찰을 수치해석적으로 수행하였으며,[17] 1983년에는 Na side bar를 가지는 평판선형 유도전자식 펌프의 특성을 검토한 바 있다.[18]

한편, 1980년대 들어서 지금까지의 일본 내의 전자식 펌프 개발을 살펴보면 주로 고온(600℃)에서 나타나는 펌프 구성 재료의 전자기적 물성, 특히 액체소듐 풀 속에 펌프가 잠기어 구동될 때의 단열재, 내화재료의 성질 등에 관한 연구가 이루어졌다. 또한 펌프 운전시 동작변수에 따른 실험 결과에 의거하여 제작된 펌프의 물리적 성질, 동작특성도 조사되었다.[19-28]

1986년 미국의 Columbia 대학에서 석탄과 같은 bulk material의 수송을 위한 열수력학적 전자캡슐펌프에 관한 실험을 한 바 있으며,[29,30] 1987년 미국의 Dow Chemical Company에서는 마그네슘, 알루미늄, 납 등과 같은 고온 용융금속의 수송시 외부 냉각원 없이도 작동될 수 있으면서 내열온도가 815℃까지 가능한 환단면형 전자식 펌프를 개발하였다.[31] 1988년 소련의 Efrenov Electric Equipment Research Institute는 BN-350 원자로의 2차측 냉각계통에

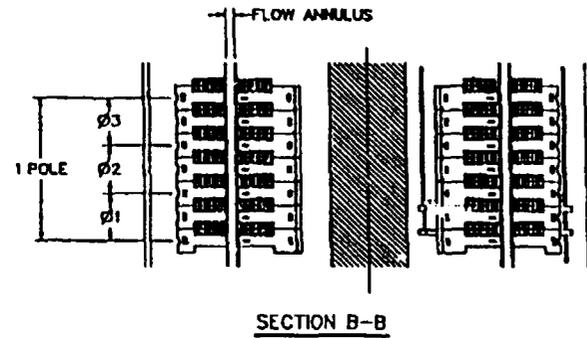
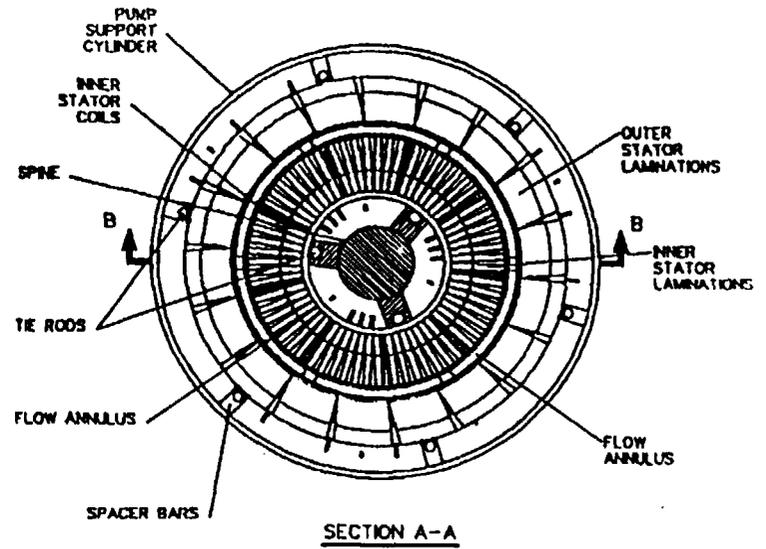
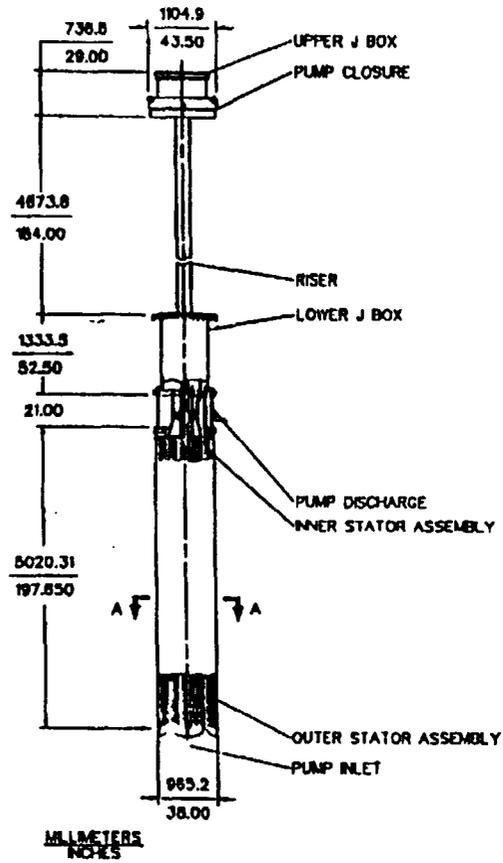
사용할 목적으로 유량을 3,500 m³/hr의 펌프를 실험적으로 제작한 바 있는데 이 펌프는 수직원통 channel로서 액체금속의 흐름이 180° 바뀌는 형태를 가지고 있는 펌프로서 다른 나라에서 만든 center return형 전자식 펌프와 비슷한 양상을 띠고 있다.[9]

액체 소듐용의 전자식 펌프는 대부분 선형 유도펌프로서 CEA와 제휴한 프랑스의 FRAMATOME 사의 Novatome Division, 일본의 Sukegawa 전기 등에서 상용화된 중소형의 배관 장착용 펌프를 판매하고 있으며, 대용량의 고속 중식으로 풀침지형 전자식 펌프는 일본 전력중앙연구소에서 제작하여 열수력학적 특성 실험을 하고 있으며, 1차 소듐펌프를 Flow Coupler라는 개념의 전자식 펌프로 대체하려는 연구 개발도 병행하였다.[2] 미국도 ALMR(PRISM) 개발에 맞추어 1986년부터 1994년까지 단계적인 고온 전자식 펌프 개발계획을 세워 펌프 재료, 설계, 제작, 특성 실험, 운전 및 제어 등에 관한 연구를 수행한 바 있다.

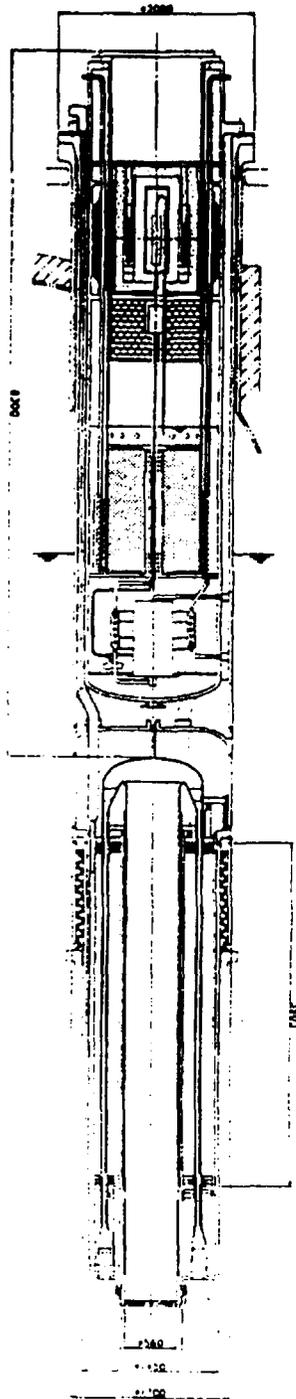
일본 전력중앙연구소(CRIEPI)의 혁신 원자로 설계 개념인 MDP(Modular Double Pool) Reactor와 소형로 Plant 개념의 ADP(Advanced Double Pool) Reactor에서는 1, 2차 전자식 펌프를 모두 침지식 전자식 펌프로 채택하여 출력운전시 회전 등의 기계적인 작동을 하는 기기를 제거하였다.[2] 침지식 전자식 펌프를 채용함으로써 소형화, 모듈화가 가능하게 된다. 그러나 전자식 펌프는 기계식 펌프와 달리 자체의 관성이 없으므로 전자식 펌프 가동시에 항상 함께 작동하는 동기장치의 flywheel을 이용하여, 외부전원 상실시와 같이 전자식 펌프가 trip되어도 flywheel의 회전 관성력의 구동에너지에 의하여 동기장치가 발전기 역할을 수행하여 유량이 서서히 감소하도록 해주어야 한다. 한편 미국의 PRISM의 경우는 처음에 일차계통은 전자식 펌프, 이차계통은 원심펌프를 채용하였다가 모두 전자식 펌프로 수정하였다. PRISM과 MDP의 1차 전자식 펌프 설계제원을 그림 4, 5에 각각 나타내었다.

2011년까지 액체금속로 원형실증로인 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 건설을 위한 요소 기술 개발로써 국내에서는 서울 대학교에서 배관장착용 및 침지식 환단면형 선형유도전자식 펌프의 기본 설계를 마치고 우선 나트륨의 유량 60 l/min, 800 l/min, 최고 사용 온도 400℃, 600℃의 배관장착용 펌프를 자체 제작하여 기본적인 동작 실험을 수행하였다[32].

그림 4. PRISM의 1차 전자석 펌프



YPIAAGEBRA



Design Specification

Type	2 Stator ALIP
Number of units	4 / module
Flow rate	75m ³ /min
Head	70mNa
NPSH	18mNa
Outlet pressure	6.1kg/cm ²
Sodium temperature	375°C

(mm)

그림 5. MDP형 LMR의 1차 전자식 펌프 설계제원

그러나 궁극적으로 액체금속로의 요소기기로서의 생산 활용 단계에 이르기까지는 효율개선 문제, 사용 재료 문제, 대용량화에 따른 기술적 문제, 소듐 취급문제, 소듐 유체 흐름의 불안정성 문제등 해결할 과제들이 많이 남아 있다. 한국원자력연구소에서 진행 중인 액체금속로 냉각재 기술 개발과 관련된 열수력학적 특성 실험의 소듐 순환계 구동은 Novatome의 전자식 펌프를 수입하여 사용하고 있다.

전자식 펌프는 장치 자체의 고유한 단순성과 기계적 구동 부품이 필요치 않아 펌프를 단순화시켜 순환계통 규모를 획기적으로 간소화할 수 있으며, 임의의 장소에 설치하여 운전할 수 있는 자유도가 커서 원자로 용기 및 순환 배관 설비를 소형화할 수 있다. 전자식 펌프를 구성하는 전자석 코일, 철심, 절연재, 구조재 등의 재료는 600℃ 정도의 원자로 나트륨 풀 속의 고온 상태에서도 상온에서와 같은 물리적 특성이 유지되어야 하는 높은 신뢰성이 요구되며, 화학적 반응성이 강한 소듐의 취급기술은 물론 소듐과 접촉되는 구조재와 부품의 선정 및 제작 기술 습득이 축적되어야 한다. 따라서 이러한 재료에 대한 내열성, 내방사선성, 고온에서의 전기적, 자기적, 기계적 특성에 대한 면밀한 실험을 통해 최적의 전자식 펌프 시스템 재료들을 선택하여 확보하는 것이 선행되어야 한다.

전자식 펌프는 사용 위치와 형식에 따라 그 설계와 제작 조건이 달라지며, 효율이 높고 고온에서 안정된 펌프 운전을 위한 펌프내 자속 분포, 온도 분포, 자기 유체 역학적 운동 특성 및 안정성에 대한 이론적 해석과 이를 배경으로 한 펌프의 설계 제작과 운전이 뒤따라야 한다. 또한 정격 운전과 부분 부하 운전시에 안정되게 운전될 수 있도록 전자식 펌프 시스템의 전원 및 제어 계통에 대한 연구와 대용량화하였을 때 나타날 수 있는 기술적 문제점들을 예측하여 해결하는 공학 설계도 수반되어야 한다.

또한 액체금속로 풀침지형 전자식 펌프 개발 연구로써 사용온도 600℃, 최대 유량을 60 l/min의 소형 침지식 환단면 선형유도전자식 펌프를 최적설계하여 차후 펌프 제작시의 직접적인 자료로 이용하도록 하였다. Pool 속에서 별도의 냉각 시스템이 없이 600℃에서 펌프가 안전하게 작동되기 위해서 펌프 구성 재료는 고온 내방사선 특성조사에 의한 최적 재료를 선정, 일부 확보하고 펌프 철심, 코일의 발열은 덕트 및 케이싱을 따라 열전도성이 우수한 소듐

속으로 전열시켜 이의 순환에 의해 완화되는 자체 냉각형의 개념으로 설계하였다.[33]

2. 비교 평가 설계 개념

2.1 기계식 펌프

소듐에 사용하는 기계식 펌프는 대개 원심 펌프로서 1954년 상용화된 120 gpm(454 l/min) 급의 펌프 이후로 발전하여 현재 시험가동중인 MONJU에는 1420 kg/sec 급의 원심 펌프가 장착되어 있다. 일반적으로 기계식 펌프는 impeller, vane, diapragm 등의 가동부가 펌프 유체 내부에서 동작하는 것들을 지칭한다. 액체금속에 사용하는 기계식 펌프는 주로 원심(centrifugal) 펌프, 로타리(rotary) 펌프, 왕복(reciprocating) 펌프 등의 세가지 범주로 분류된다.

2.1.1 원심 펌프

액체 소듐을 수송하는 펌프의 대부분은 원심펌프이다. 원심력을 주된 작동 원리로하는 펌프이지만, 디자인의 차이가 있으므로 수력학적 특성에 따라 세분하고 기계적 배치에 따라 분류한다. 액체 금속계통에 사용하는 펌프들은 비교적 압력 상승이 작고, 수두(head)가 120m을 넘는 것은 드물다.[10]

수력학적 특성은 impeller의 직경과 너비의 비율에 의하여 결정된다. radial 방식의 impeller는 axial impeller에 비하여 높은 head rise를 일으킨다. 액체금속속에서 원심펌프의 성능은 일반적인 수력학 법칙에 의하여 결정된다. 물에서의 성능에 기초하여 평가한 액체금속 원심펌프의 흡입 압력 요구치가 똑같이 적용됨이 알려졌다. 수력학적 효율은 유지되는 한편, 펌핑되는 유체의 비중이 1보다 작으므로, 액체금속 펌프의 마력 요구치는 같은 성능의 물 펌프의 요구치보다 작아진다.

펌프의 기하학적 구조는 volute나 diffuser와 같은 유체 회수 장치의 선택에 중요한 변수이다. 원심 펌프 개념을 더욱 세분하면, 자유액면(free surface) 방식과 밀봉형(completely filled design)으로 나뉘어진다. 자유액면 펌프는 소듐에 대하여 직접적으로 밀폐하는 것을 피하기 위하여 항상 수직으로 shaft에

장착된다. 밀봉형 펌프는 액체금속에 대한 밀폐가 필요하며 어느 위치에서나 shaft에 장착될 수 있다. 적용할 시스템에서 펌프 shaft seal을 보호할 가시공간의 사용이 불가능하면 밀봉형 펌프를 채택할 수 있다. 그림 6에 기계식 원심 펌프의 구조를 나타내었다.

2.1.2 로타리 펌프

로타리 펌프 개념에는 캠(cam), 스크루(screw), 기어(gear), vane 방식 등이 포함된다. 이것들은 모두 positive-displacement type으로 액체금속에 적용할 때 제약성이 많다. 적용되는 예가 적고, 높은 압력 증가가 필요한 저 유량의 시스템에서 사용한다. 우주선에서 고온의 working fluid로 고압의 NaK를 공급하기 위한 장치로 연구된 것이다.[34] 기어 방식은 3000psi, 1000°F에서의 1 gpm 유량 시험에서 bearing 고장으로 실패하였으나, vane 방식 펌프는 1500psi, 1200°F에서 5 gpm 급의 시험에서 15시간 동안 NaK-77 속에서 작동하였다. shaft-seal이 파괴되어 작동이 정지할 때 까지 기록한 최고 온도는 750°F이었다.

2.1.3 왕복 펌프

아주 적은 유량에서 높은 압력이 필요할 때 사용한다. diaphragm 방식의 펌프가 573°C의 NaK에서 0.6gpm으로 펌프하는데 사용된 실적이 있으며, 5376 시간 동안 성공적으로 작동하였다.[35]

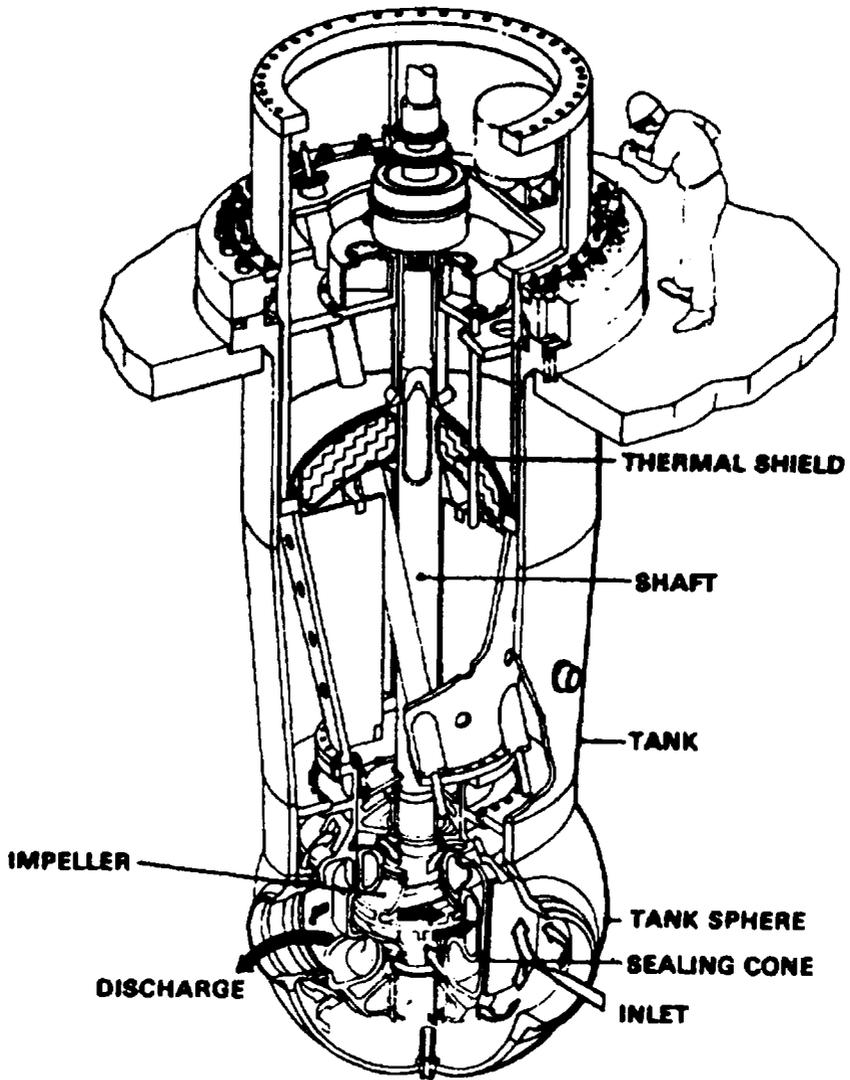


그림 6. 기계식 원심펌프의 구조도

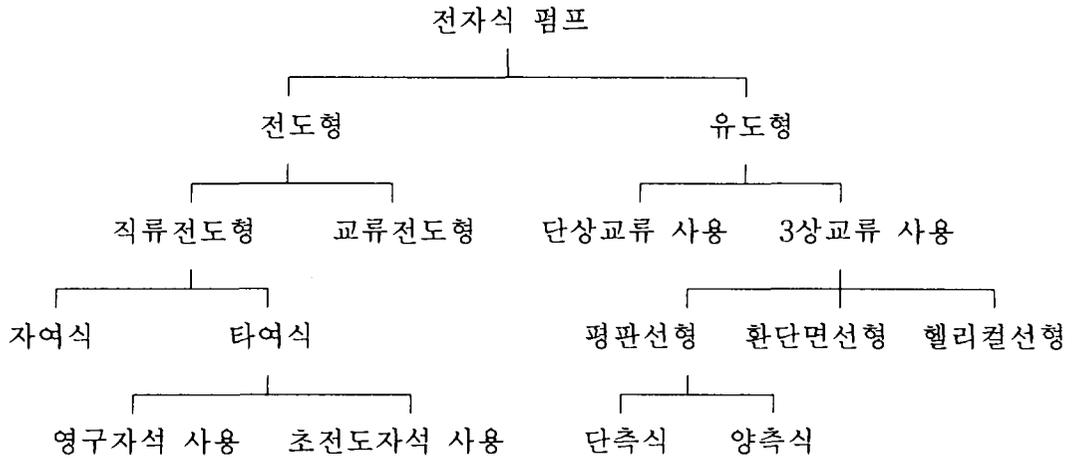
2.2 전자식 펌프

전자식 펌프는 장치 자체의 고유한 단순성 뿐만 아니라, 기계적으로 움직이는 장치 부품이 없어 bearing이 필요없고, dynamic seal이 요구되지 않아 배관을 단순화시킬 수 있어 냉각재 순환계 규모를 획기적으로 축소시킬 수 있는 이점이 있다. 또한 펌프를 순환계의 임의의 장소에 설치하여 운전할 수 있으며, 정비시 액체금속 배관계통을 개봉하지 않아도 되는 정비상의 이점도 있으며, 원자로내에 액체금속과 충전기체 사이의 자유표면이 존재하지 않아 반응도 변화에 미치는 영향을 극소화시킴으로써 원자로의 안정성을 높일 수 있다. 이때 냉각재로서 가장 적절한 소듐 (Na)은 뛰어난 열수송 성질을 지니고 있으며, 전기전도도가 매우 크므로 전자식 펌프의 채용이 가능하다. 또한 소듐은 경수로에서의 냉각재인 물과 달리 고속중성자에 의한 방사화로 인하여 1차, 2차의 열순환 계통이 필연적이며, 이 두 순환계통에서의 열수력학적인 특성 및 설계 요구사항에 따라 전자식 펌프를 사용한다.

전자식 펌프는 기계식 펌프와 달리, 처음부터 고온의 용융 금속의 수송을 위해서 연구개발되었다. 회전 전동기를 이용하는 기계식 펌프를 이용해서 용융금속을 수송하려면 회전 날개가 고온의 용융금속내에 장시간 잠겨 있어야 하는 까닭에 열피로에 의한 물성의 변화로 인해 나타나는 강도 감소 현상, 또 사용후 관내에서 용융 금속이 굳을 경우 회전 날개도 고체의 금속내에서 움직일 수 없게 되는 등 많은 결점이 있어 기계식 펌프를 곧 바로 용융 금속 수송에 사용하기는 곤란하다. 이러한 단점을 극복하기 위해 연구 개발된 것이 바로 전자식 펌프이다.

모든 전자식 펌프의 원리는 기본적으로 전도성을 띠는 액체 금속내에 전류와 자기장을 서로 교차되도록 해 줌으로써 이들의 수직 방향으로 로렌츠의 유도 전하력이 발생되어 액체금속이 움직이도록 하는 것이다. 그러므로 전자식 펌프의 종류는 액체 금속내에 전류를 발생시키는 방법에 따라 외부전원에 의해 액체 금속내에 직접 전류를 흘리는 전도형 펌프와 단상 및 다상 교류로 발생시킨 자기장에 의해 유기된 유도 전류를 흐르게 하는 유도형 펌프로 대별된다[6,17].

위에서 설명한 여러 전자식 펌프들을 유형별로 세분하여 나타내면 다음의 도표와 같이 분류된다.



2.2.1 전도형 펌프

전도형 펌프는 사용하는 전원에 따라 직류 전도형과 교류(단상 및 3상) 전도형으로 나눌 수 있고, 직류 전도형은 자기장 발생용 전원에 의해 다시 자여식(自勵式)과 타여식(他勵式)으로 나뉜다. 대표적으로 그림 7의 직류용 전도형 전자식 펌프에서 볼 수 있는 바와 같이 전도형 펌프에서 전류 공급은 액체금속뿐만 아니라 duct 벽에도 주어지기 때문에 duct 벽을 흐르는 전류는 덕트를 가열시켜 주유열 손실을 가져오게 되어 전체 공급 전류의 상당 부분을 차지한다. 전도형 펌프는 동작이론이 비교적 단순하여 상세한 이론적 검토가 이루어져 왔으나, 용융금속에 직접 접하는 전극이 필요한 까닭에 고온금속의 이송에는 적합하지 않다는 단점이 있다.[6]

2.2.2 유도형 펌프

유도형(Induction Type) 펌프에서 전류는 시간적으로 변하는 자기장에 의해 액체금속 내에 자기장과 수직으로 유기된다.[10] 이 전류와 자기장이 벡터

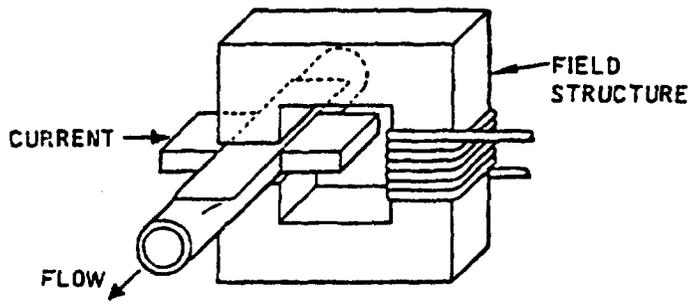


그림 7. 직류 전도형 전자식 펌프

곱으로 나타나는 전자력으로 펌프 구동이 되므로 외부적으로 전류는 따로 공급하지 않아도 되는 잇점이 있다. 자기장 발생은 고정 전자석 또는 회전하는 영구자석을 사용한다.

유도형 펌프는 사용하는 전원에 따라 단상 및 3상 전원을 사용하는 것이 있고, 3상 교류용 펌프는 모양에 따라 다시 그림 8과 같이 duct를 사이에 두고 전자석이 그와 나란히 배치되어 있는 평판 선형(平板線形, Flat Linear Induction Pump)과, 그림 9와 같이 내부 core와 전자석을 이루는 외부 core의 사이에 환상(環狀)의 유로(流路)를 가지는 환단면 선형(環斷面線形, Annular Linear Induction Pump)으로 나눌 수 있고, 나선식의 유로를 지나는 헬리컬 선형(Helical Linear Induction Pump)으로 나누어 진다. 평판 선형은 전자석의 배치에 따라 다시 duct 한 쪽에만 전자석 코어가 있는 편측식(single-sided)과 duct 양쪽에 코어가 있는 양측식(double-sided)으로 나뉜다.

유도형 펌프는 기초 방정식이 복잡한 까닭에, 펌프에 대한 등가회로를 구성하여 2차 도체를 1차측의 등가적 부하로 간주하고서 풀이하거나,[36,37] 아니면 적절한 경계조건과 함께 기초방정식을 풀어서 field를 구하여 펌프의 동작을 설명하는 등의 여러 방법이 시도되고 있다.[36] 유도형 전자석 펌프는 duct 구조가 간단하고 비교적 제작도 용이하며 유량의 제어가 손쉽다는 등의 장점이 있어 전도형 펌프에 비해 많이 이용되고 있다.

소듐용 선형 유도전자석 펌프는 교류 전자석으로 발생시킨 자기장과 이로 인해 유기된 소듐 내의 전류에 의해 나타나는 전자력으로 펌프를 구동하므로, 펌프에 사용되는 전자석 코일, 철심, 절연재 등의 구성 부품과 재료는 600 °C 정도의 고온 상태에서 물리적인 성질의 높은 신뢰성이 요구되며, 화학적 반응성이 강한 소듐의 취급은 물론, 소듐과 접촉되는 구조재와 부품의 선정과 제작 조건이 까다로와 이에 대한 기술 습득이 선행되어야 한다. 전자석 펌프는 사용 위치, 형식 및 용량에 따라 그 설계와 제작 조건이 달라지며, 효율이 높고 안정된 펌프 운전을 위한 펌프내 자속 분포, 온도 분포, 자기 유체 역학적 운동 특성 및 안정성에 대한 이론적 해석과 이를 배경으로 한 펌프의 제작과 운전이 뒤따라야 한다. 또한 정격 운전과 부분 부하 운전시에 안정하게 운전될 수 있도록 전자석 펌프 시스템의 전원 및 제어 계통에 대한 연구도 수반되어야 한다.

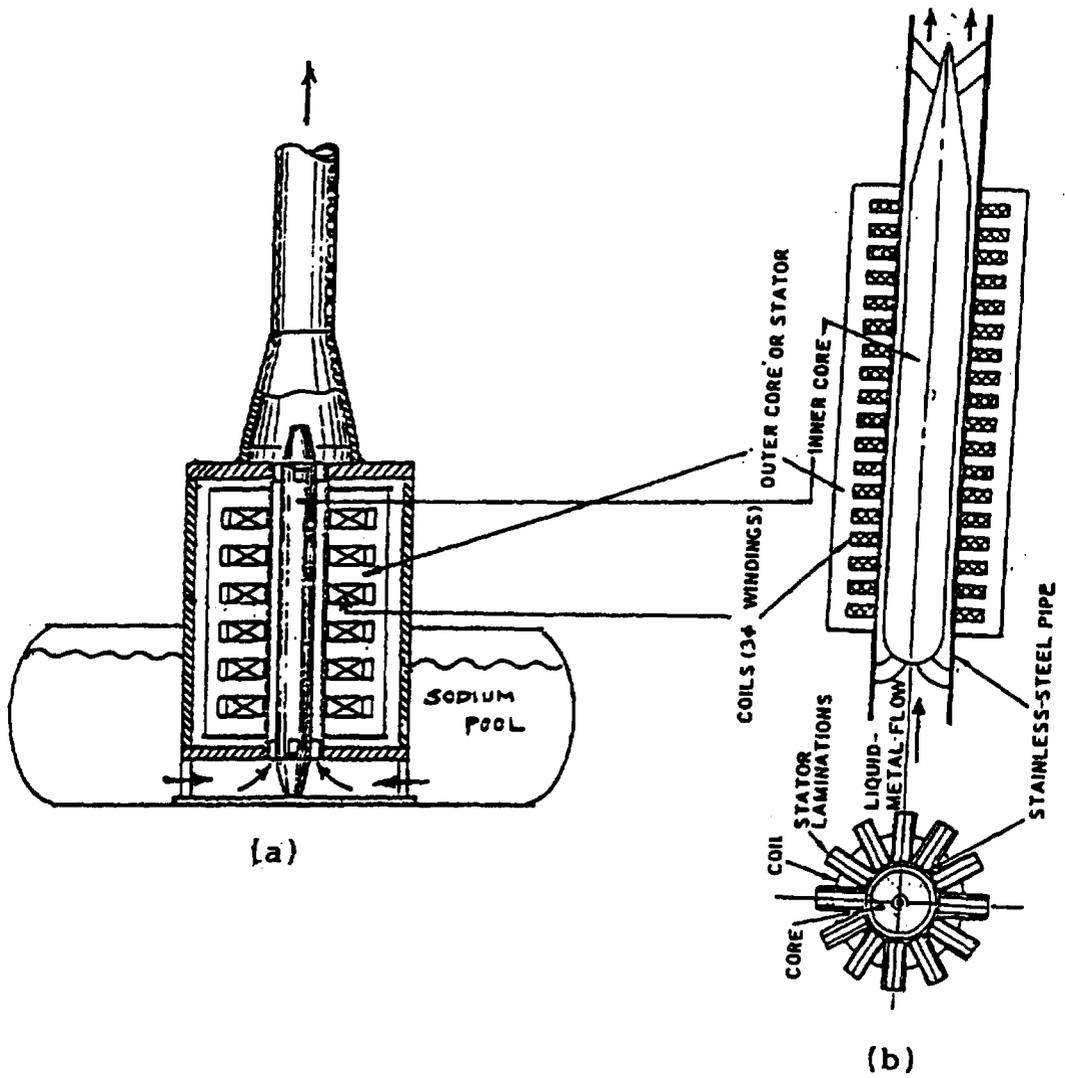


그림 8. 환단면 선형 유도형 전자식 펌프
 (a) Submersible-in-pool type(pool 침지형)
 (b) Externally-supported-duct type

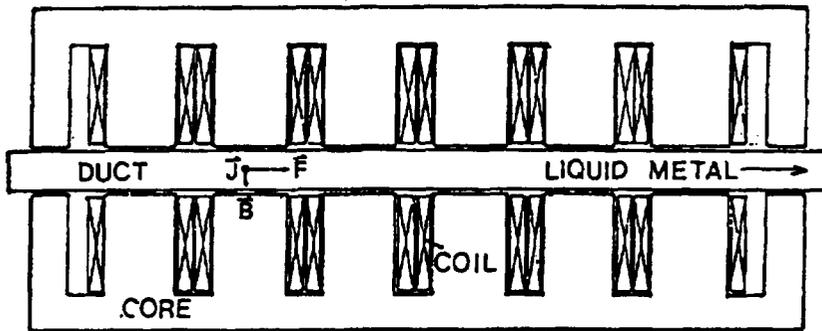
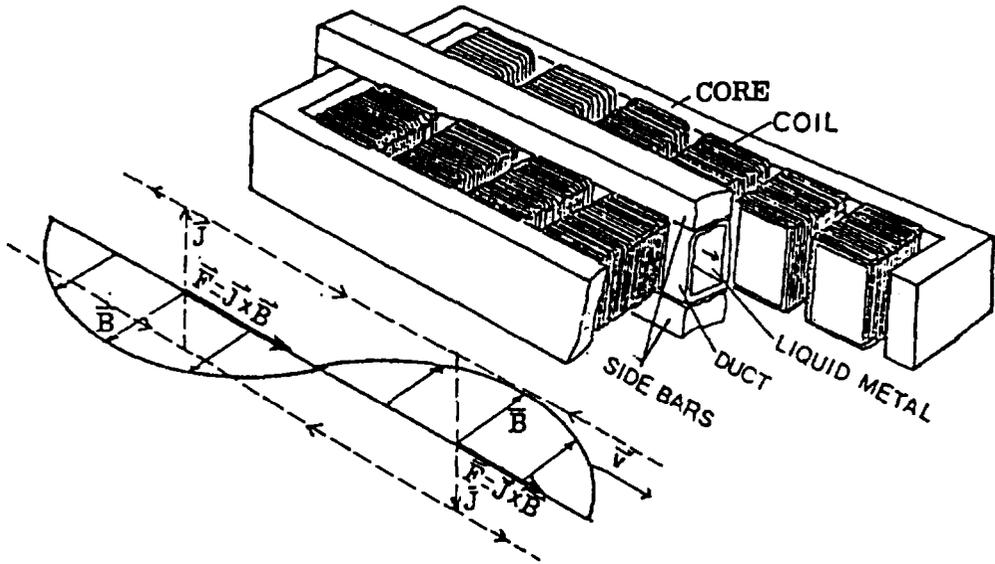


그림 9. 평판 선형 유도형 전자식 펌프

구된다.

전자식 펄프의 동작은 기본적으로 전도성 유체의 전자기적 구동력을 바탕으로 한 것이기 때문에 특히 대용량화된 전자식 펄프 개발에 있어서는 자기유체역학적(MHD) 해석에 의한 유체의 동적 특성 및 안정성 규명이 면밀히 요

구된다. 안전 영역에서 작동되도록 조절하는 안전 조치도 고려되어야 한다. 펄프 내에 장착하여 동작 온도 이상에서는 자동적으로 펄프가 정지되거나 단락되지 않도록 coil간의 절연성을 유지하여야 한다. 한편 온도 감지 열전쌍 판 사이의 절연이 파괴되지 않아야 하고, 전자식을 구성하는 coil도 고온에서 재료를 선택하며, core 재료를 적을시켜 전자식을 만들었을 때 고온으로 인한 Core의 선택은 고온에서 자기적 특성을 잃지 않는 즉, Curie 온도가 높은

한 소품을 사용하므로 절속재나 냉각재의 선택에도 유의하여야 한다. 용내화 단열재로 감싸 펄프를 보호할 필요가 있다. 또한, 화학적 반응성이 강된 경우에는 소품 룰 속에 담겨 사용하는 까닭에 전자식 펄프 시스템로부터의 탈출을 제거할 수 있는 냉각 장치를 필요로 한다는 것이다. 특히, 룰 (600°C)의 소품을 대상으로 사용되므로 소품으로부터 전도되어 오는 열과 coil 기동적인 관점에서 다음에 고려되어야 할 점은 우선 전자식 펄프는 고온

2.2.3 전자식 펄프 설계 특성

였다.

원계면수들의 값의 변화에 따라 나타나는 펄프 동작의 특성을 표 4에 정리하
고 냉각재 기동개환 과제에서 수행한 전자식 펄프 개발의 계산 결과들을 토대로
문기 및 coil에 의한 탈출 동과 함께 신중하게 고려해야 할 점이다. 액체금속
장시간 운전시의 안정성 면에서 룰 임력 전류의 크기는 사용하는 전선의
다. 펄프를 운전하기 위한 동작 변수로는 임력 전압 및 전류가 있는데, 특히
변수값의 변화에 따라 예상되는 전자식 펄프에 미치는 영향을 보면 표 3과 같
기, Pole pitch, 극의 수, 내부 core의 지름, 포일의 감긴 횟수 등이 있는데 각
펄프의 외형 및 성능 좌우하는 기하학적 변수로는 duct의 폭, core의 크

표 3. 전자식 펌프의 성능에 영향을 미치는 기하학적 변수

변 수	증 가 시	감 소 시
Duct의 폭	<ul style="list-style-type: none"> · 같은 출력을 위해 큰 여자 전류가 요구되고 효율이 떨어진다. · 유체가 흘러가는 단면적이 증가한다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 출력이 커지고 효율이 증가한다. · 유체가 흘러가는 단면적이 감소한다.
Core의 크기	<ul style="list-style-type: none"> · 누설 리액턴스가 증가한다. · 허용 최대 coil 회수가 증가한다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 누설 리액턴스가 감소하고 출력이 증가하며 효율이 좋아진다. · 감을 수 있는 최대 coil 회수가 감소한다.
Pole pitch	<ul style="list-style-type: none"> · 동기속도가 증가한다. · 장치의 규모, 내부 core의 길이가 커지고, 무게도 증가한다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 같은 입력에 비해 유체내의 체적력이 증가한다. · 장치의 규모가 작아진다.
극의 수	<ul style="list-style-type: none"> · 펌프 규모가 커지므로 단위 길이당 입력을 줄일 수 있다. · 장치가 커진다. · End effect는 감소한다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 2차측의 누설 리액턴스가 증가한다. · 단위 길이당 입력을 늘려야 한다.
내부 core의 지름	<ul style="list-style-type: none"> · 같은 duct 폭에 대해 유체 단면적이 증가한다. · 장치의 무게가 증가한다. · 효율이 감소한다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 유체의 단면적이 감소한다. · 장치의 무게가 감소한다. · 효율이 증가한다.
Coil 횡수	<ul style="list-style-type: none"> · 같은 출력을 위해 필요한 전류가 줄어든다. · 장치의 무게가 증가하고, 기하학적 수치에 의해 허용 최대 coil 회수가 한정된다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 입력 전류를 늘려야 한다

표 4. 펌프 동작 특성에 미치는 설계 변수들의 영향

<p>내부 core의 크기</p>	<p>다른 조건이 같다면 core 지름의 증가에 따라 전류는 거의 일정한 값을 유지하나 전압 및 그에 따른 전력은 비례하여 증가하여 결과적으로 효율이 점점 떨어진다. 게다가 core가 커질수록 장치의 무게는 훨씬 큰 폭으로 증가하여 이로운 점을 찾을 수가 없다. 제작상 불편이 없고 정해진 유로폭에 대해 적절한 유로 단면적만 줄 수 있다면 가능한 한 내부 core의 크기는 작은 것이 좋다.</p>
<p>Pole Pitch</p>	<p>기타의 변수가 일정하다면 pole pitch가 증가함에 따라 누설자속이 증가하고 따라서 같은 출력을 얻기 위해서는 더 큰 입력이 요구된다. 또 core의 크기가 커지면 그에 따라 전체 장치도 커지므로 무게가 증가하는 등 이점이 없다. 이 역시 가능한 한 작은 pole pitch가 요구되나, 너무 작으면 감을 수 있는 최대 coil 회수가 줄어들고, 그러면 원하는 출력을 얻기 위해서 흘려야하는 전류를 크게 해야 하므로 장치의 안전 운전상 바람직하지 못하다. 되도록 작은 pole pitch가 바람직하나 감을 수 있는 최대 허용 회수는 보장될 수 있어야 한다.</p>
<p>극의 수</p>	<p>Pole pair가 증가하면 여러 단에서 계속적인 펌핑 효과가 누적되므로 각 단에서의 입력이 줄어 전류를 작게 흘려도 되며, 또 상대적으로 edge effect도 줄게 되어 전체적으로 효율이 증가하게 된다. 그러나, pole pair가 너무 많으면 이 역시 장치를 크게 하므로, 안정된 입력 전류값을 얻을 수 있는 범위내에서는 극의 수를 줄이는 것이 바람직하다.</p>
<p>Duct의 폭</p>	<p>Duct의 폭이 줄어들수록 같은 전류에 대해 유체 내부의 자장은 증가하고 누설자속은 줄어들어 입력을 줄일 수 있으나, 지나치게 작은 duct 폭은 제작상의 문제점 유발, 원하는 유량을 얻기 위해 높은 유속이 요구되고 따라서 마찰력 증가 등의 난점이 있으므로 이를 충분히 고려해 주어야 한다.</p>
<p>Coil 횡수</p>	<p>일반적으로 coil 횡수가 증가할수록 전류가 현저히 줄어들어 안정성을 높일 수 있고 그에 따라 입력 전력도 줄어들어 효율도 증가한다. 단, coil 횡수가 늘면 구리손의 증가와 장치 무게의 증가 등이 수반되나, 얻을 수 있는 이점이 더 크다고 볼 수 있다.</p>

2.2.4 전자식 펌프 구성재료의 고온 및 내방사선 특성

침지형 전자식 펌프에서 가장 문제가 되는 것은 사용재료의 고온 및 내방사선 조건에서의 특성들이다. 이는 이 펌프의 검증과도 밀접한 관계가 있으며 이 분야의 연구 개발은 아직도 진행 중에 있다. 현재 국내에서 개발하고 있는 전자식 펌프와 함께 이 분야의 문헌들을 분석하면 다음과 같다.

가. 철심재료의 자기적 특성

1) 철심재료의 온도 변화에 따른 자기적 특성

액체금속로의 냉각재 순환을 위하여 사용되는 전자식 펌프가 설치될 위치에서의 냉각재인 액체 소듐의 온도는 대략 550℃로 매우 고온이다. 따라서 전자식 펌프의 구성재료는 600℃에서도 물리적 특성의 변화가 없어야 하며 특히 전자식 펌프의 구동력을 발생하는데 사용되는 철심재료는 이 온도에서 기계적 특성뿐만 아니라 자기적 특성도 보존되어야 한다.

그림 10은 액체금속로 냉각재 기술개발 과제에서 규소강판에 대하여 측정된 결과로서 일정한 인가자장에 유도자속밀도의 값이 온도에 따라 전반적으로 감소하다가 대략 740℃와 750℃ 사이에서 완전히 자성을 잃는 것을 알 수 있다. 또한 상온에서의 자화곡선을 보면 대략 70 A/m의 인가자장에서 대략 1.5 T의 유도자속밀도를 얻었으며 상대투자율은 15,000정도로 나타나는데 이 때까지는 인가자장의 증가에 대하여 유도자속밀도가 크게 증가하나 이 값보다 큰 인가자장부터는 기울기가 완만해지는 것을 알 수 있으며 그림 11에서는 인가자장 30 A/m 부근에서 투자율이 최대가 되는 것을 알 수 있다.

또한 목표로 하는 전자식 펌프의 동작온도인 600℃에서의 자화곡선을 보면 전반적으로 인가자장에 대한 유도자속밀도가 상온에 비하여 대략 30-50%의 값을 가지며 자화곡선의 모양도 훨씬 완만한 형태를 가지고 있으며 그림 10에서 포화자속밀도도 대략 0.9-1.0 T 사이에 있음을 알 수 있으며 그림 11와 그림 13의 상대투자율의 곡선을 살펴보면 최대상대투자율이 30 A/m 부근에 있는데 이 값은 상온에서의 최대상대투자율의 30%정도인 8,000 정도임을 알 수 있다.

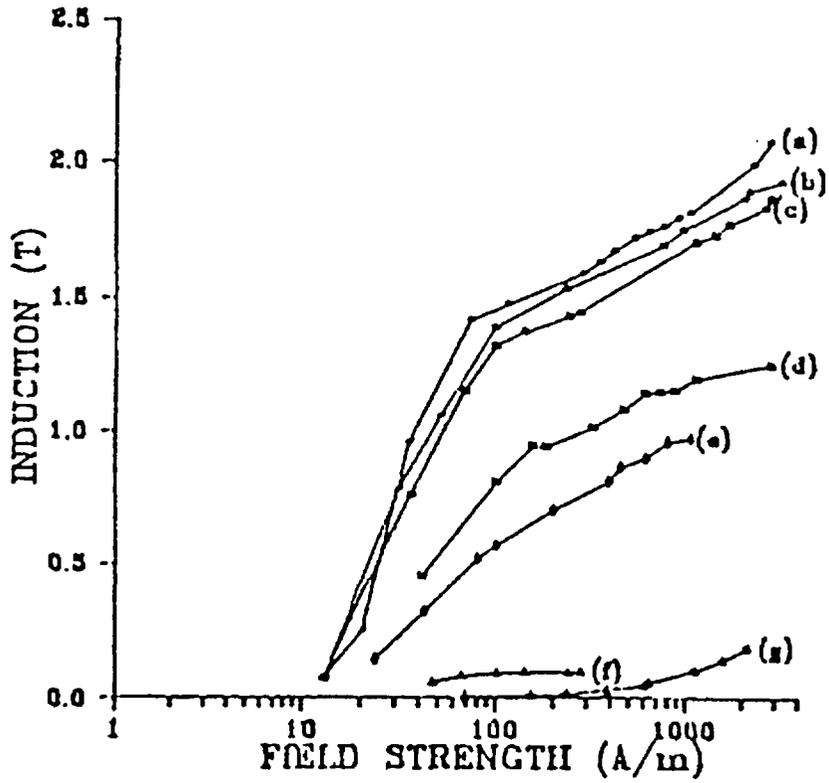


그림 10. 방향성 규소 강판의 여러 온도에서의 유도 자속 밀도

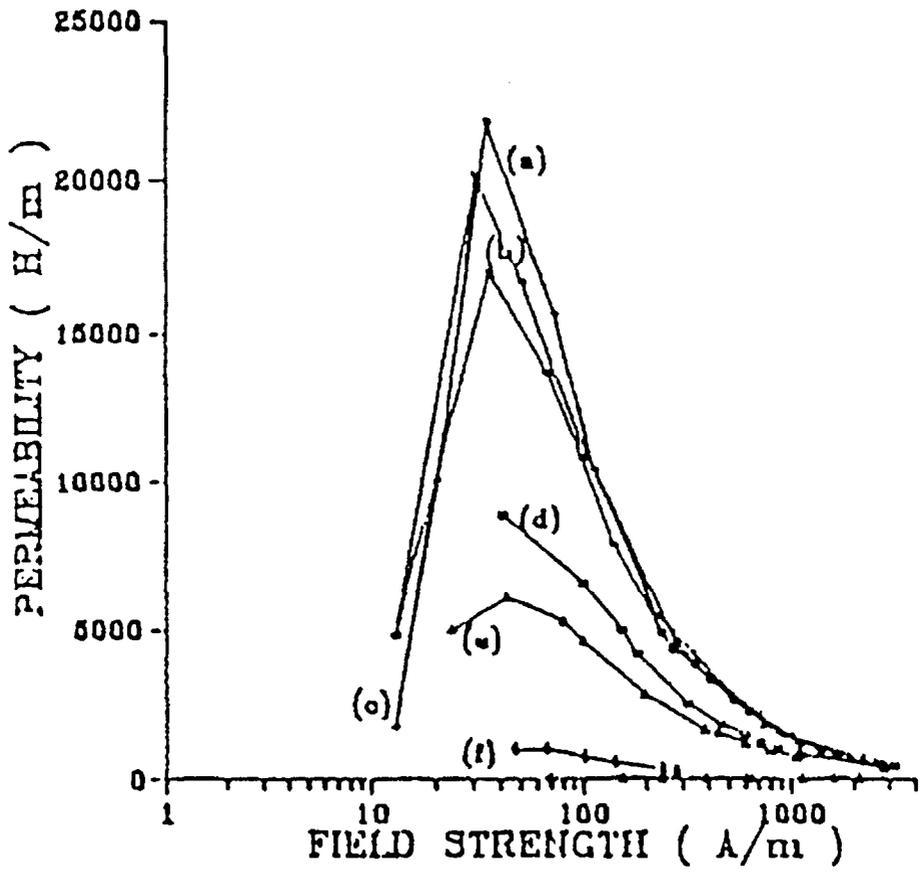


그림 11. 방향성 규소 강판의 여러 온도에서의 상대 투자율

그림 12과 그림 13의 온도에 따른 포화자속밀도와 최대상대투자율의 변화를 살펴보면 모두 대략 500℃를 조금 넘는 온도에서 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 이 방향성 규소강판의 Curie 온도가 대략 745℃ 정도이므로 이 온도의 절대온도에서의 0.8배 되는 온도를 찾으면 540℃가 되며 Bloch의 T3/2 법칙[38]에 의해 강자성체가 Curie 온도의 0.8배가 되는 온도에서 포화자속밀도와 최대상대투자율이 급격히 감소하기 시작한다는 설명과 비슷한 결과를 보이고 있다.

전반적으로 온도에 따른 방향성 규소강판의 자기적 특성은 600℃에서 상온에 비하여 포화자속밀도가 상당히 낮으므로 이론적으로 계산한 펌프의 설계변수값이 포화영역에 존재할 위험성이 있으며 낮은 상대투자율로 인하여 유도자속밀도의 값도 적어 결과적으로 펌프에서의 출력과 효율의 감소가 예상된다. 결과적으로 방향성 규소강판은 전자식 펌프의 목표 동작온도인 600℃에서 전자석 코아의 재료로 사용은 가능하나 낮은 상대투자율로 인한 효율의 저하 위험과 낮은 포화자속밀도로 인한 전자식 펌프의 설계 상의 주의를 요구하며 전자식 펌프의 전자석 코아의 온도가 700℃를 넘지 않도록 주의 깊은 작동을 요하게 된다.

2) 철심재료의 중성자 조사 특성

액체금속로에서 전자식 펌프는 1차 용기 내부의 IHX와 결합하여 배치되므로 고온에서의 사용뿐만 아니라 노심에서 연료의 핵반응 부산물과 더불어 생기는 고속중성자에 직접 노출되게 된다. 액체금속로 노심에서 발생하는 큰 에너지를 가진 고속중성자는 전자식 펌프의 여러 성분에 조사될 것이며 이 중성자 조사에 의하여 전자식 펌프의 구성재료의 물리적 특성들에 많은 변화가 발생할 것으로 예상된다. 따라서, 전자식 펌프 구동의 중요한 성분이 되는 철심재료는 자기적 특성이 가장 관심이 되는 물리적 특성이며 액체금속로 1차용기에서의 철심재료의 중성자 조사에 의한 자기적 특성의 변화는 결과적으로 전자식 펌프의 구동력에서의 변화를 가져올 수 있으므로 전자식 펌프의 설계에서 중성자 조사 후에도 자기적 특성의 큰 변화가 없는 철심재료의 선택이 요구된다.

철심재료의 중성자 조사에 의한 자기적 특성 변화는 1950년대 말 미국에서

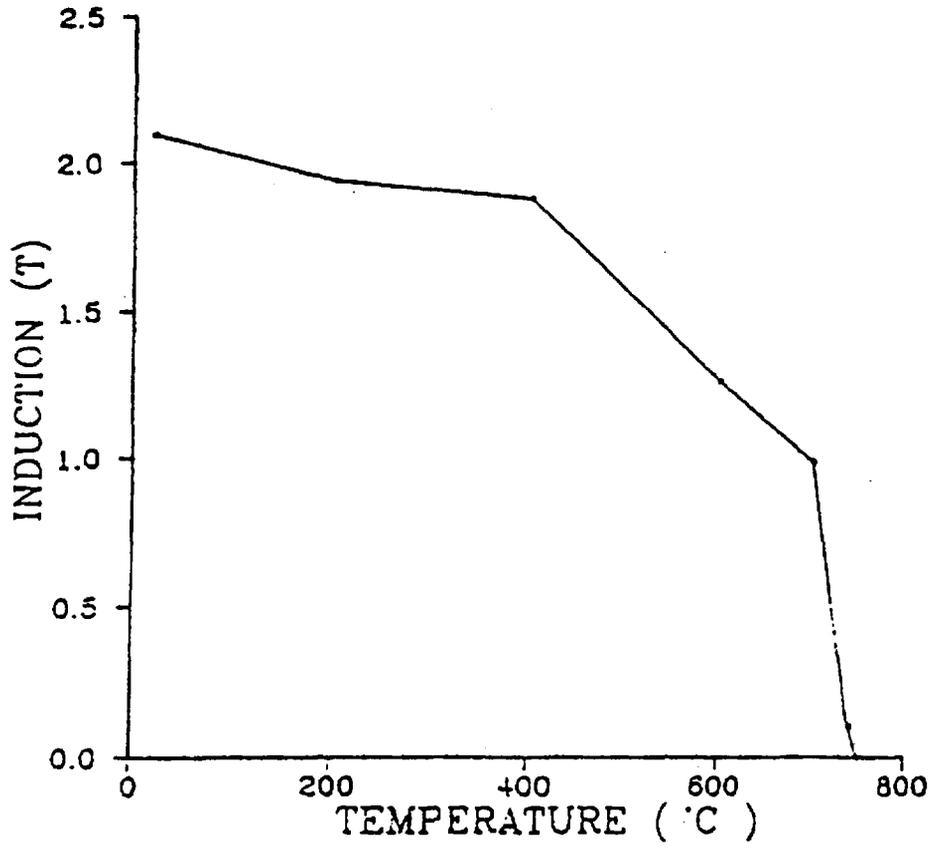


그림 12. 온도에 따른 최대 유도 자속 밀도의 변화

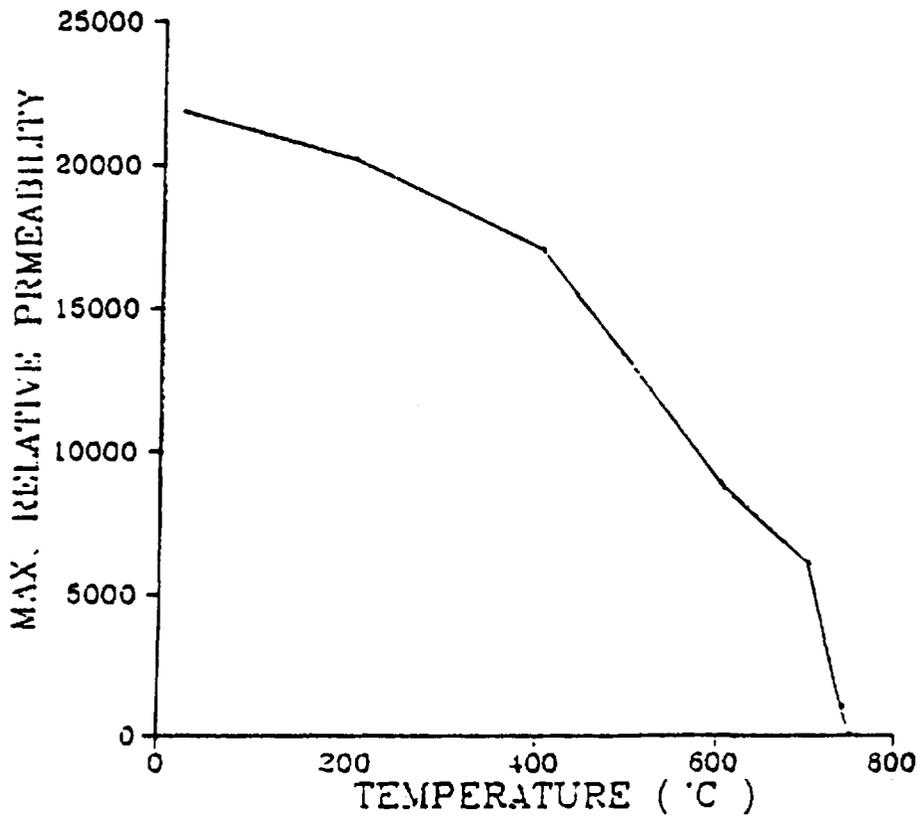


그림 13. 온도에 따른 최대 상대 투자율의 변화

연구가 되기 시작하였다. Gordon 등[39,40]의 연구에서는 3.5% 규소강판, Orthonol, 5-79 Mo Permalloy, 2 Vanadium Permendur, 16 Alfenol와 2-81 Mo Perm-alloy를 연구대상으로 하여 이 실험재료들을 Brookhaven 원자로의 W-14 실험 포트에서 1.8×10^{12} total neutrons/cm²/sec의 중성자속으로 493 시간 동안 조사하였다. 이 때의 총체적인 열중성자속은 2.63×10^{18} n/cm² (중성자 에너지 $E_n < 1$ eV), 고속중성자속은 0.11×10^{18} n/cm² ($E_n > 1$ eV)이었으며 gamma flux는 1-2 MeV 이하의 광자 에너지를 가진 것으로 4×10^{11} photons/cm²/sec이하였다. 그리고 실험에 사용된 원자로의 실험 포트에서의 온도는 낮게는 40℃에서 높게는 70℃까지 변하며 주로 55℃에서 65℃사이의 온도로 유지되었다. 실험재료 외형이 Orthonol은 테잎으로 감긴 toroid, 2-81 Mo Permalloy는 압축된 분말 고리(pressed powder ring)이고 나머지는 환적층(ring lamination)으로 되어있는데 이는 폐자기회로를 이용한 자기적 특성의 측정을 위한 것이다. 측정장치로는 DC 측정에 표준 자속측정회로, AC hysteresis loop에 전자 적분회로를 사용한 oscilloscope 등을 사용하였다.

그림 14와 그림 15은 중성자 조사 동안 측정된 DC 자기 특성의 조사된 중성자속의 증가에 따른 영향을 도시한 것이다. 이 결과를 보면 5-79 Mo Permalloy와 Orthonol이 매우 큰 변화를 일으키는 반면에 3.5% 규소강판, 16 Alfenol과 2 Vanadium Permendur는 변화가 매우 작은 것을 알 수 있다. 그리고 중성자 조사의 영향은 중성자 조사가 끝난 후에도 유지되는 것으로 몇몇 재료의 중성자 조사 후 많은 시간이 흐른 뒤의 자기 특성 조사에서 나타났다. 측정된 재료 중 중성자 조사에 가장 큰 영향을 받는 재료는 5-79 Mo Permalloy로 중성자 조사시의 최대투자율이 조사 전의 최대투자율에 대하여 93% 정도 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 5-79 Mo Permalloy와 Orthonol의 자화곡선도 중성자 조사 후에 크게 변형됨을 알 수 있다.

그리고, Brookhaven 흑연 감속로에서 행하여진 Schindler 등[41]의 실험에서는 총 10^{17} neutrons/cm²/sec의 중성자속을 가진 고속중성자($E_n > 1$ eV) 조사 후 조사 전의 60 Hz의 hysteresis 곡선을 비교한 결과 냉간 압연한 규소강판이나 배열된 알루미늄 Heusler 합금에서는 자기적 특성의 변화가 발견되지 않았으나 Fe-Ni 합금류에서는 hysteresis 곡선의 변화가 매우 심하여 새로운 구조를 나타내었다.

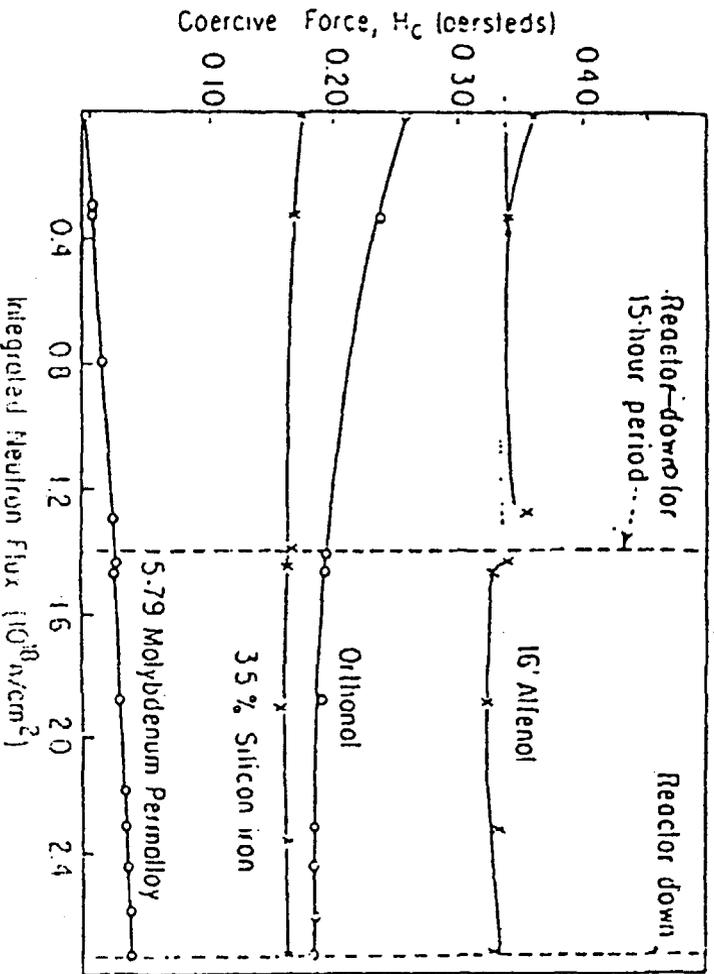


그림 14. 철심 재료의 Coercive force에 대한 중성자 조사의 영향

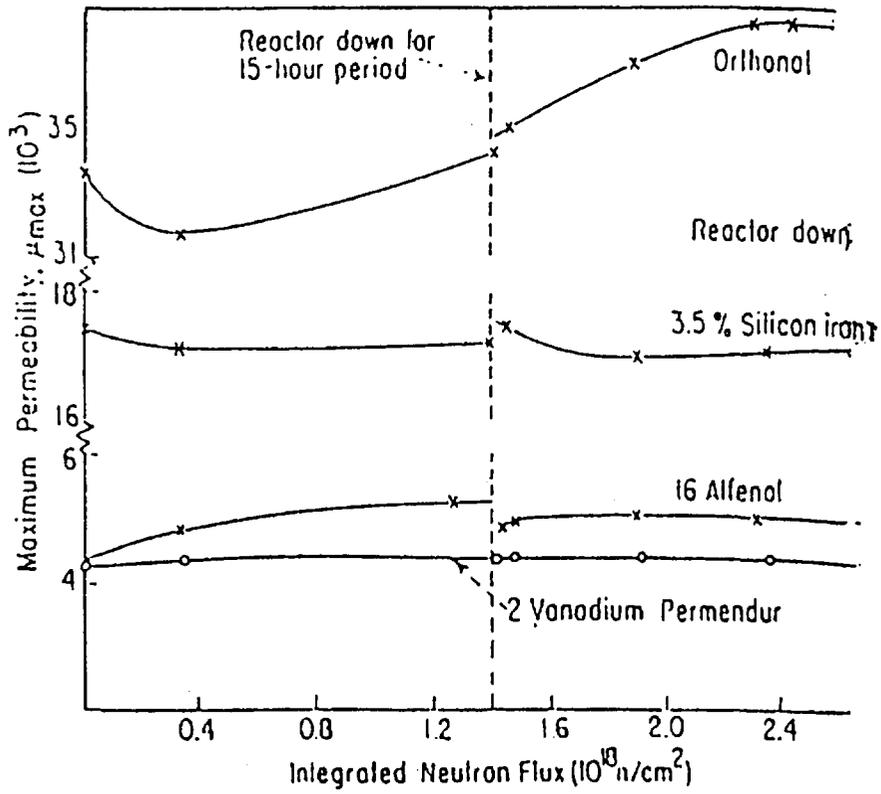


그림 15. 철심 재료의 최대 상대 투자율에 대한 중성자 조사의 영향

3) 풀침지형 전자식 펌프의 철심재료의 선택

지금까지 살펴본 결과에 의하여 풀침지형 전자식 펌프의 철심재료의 후보 재료를 살펴보면 우선 풀침지형 전자식 펌프가 액체금속로 내에서 직접 냉각재인 액체 나트륨과 접촉을 하게 되며 또한 1차용기 내에도 설치되게 되어 노심에서 핵반응으로 발생하는 고속중성자의 조사를 받게 된다. 따라서 철심재료는 대부분의 재료의 주성분이 기계적으로 우수한 특성을 가진 철이고 전자식 펌프에서의 구조가 큰 힘을 받는 형태는 아니기에 현재의 동작온도나 중성자 조사에서의 기계적 특성은 큰 문제가 되지 않지만 고온 고속중성자의 조사에서도 자기적 특성이 크게 변하지 말아야 한다.

위의 요구 사항에 대하여 후보 철심재료들에 대한 적합성 여부를 살펴보면 우선 가장 널리 사용되는 철심재료인 Fe-Ni 합금류는 일반적으로 상온에서는 20,000 이상의 높은 최대상대투자율 등의 우수한 자기적 특성을 보유하고 있으나 낮은 Curie온도와 중성자 조사에서의 큰 자기적 특성의 손실로 인하여 적합하지 않다.

적합한 철심재료로는 규소강판이나 Fe-Co 합금류인 Permendur가 있으며 규소강판은 Fe-Ni 합금류보다는 투자율이 낮으나 상대적으로 높은 Curie 온도(750℃)를 보유하고 있어 현재 액체금속로 내에서의 전자식 펌프의 동작온도로 사려되는 600℃에서 자기적 특성을 어느 정도 유지하고 있으며 중성자 조사에 의한 자기적 특성의 변화가 거의 없는 것으로 나타나 있다. 또한 가격면에서도 규소강판은 비교적 낮은 가격을 가지고 있고 국내에서도 생산되고 있으므로 확보가 쉽다.

Permendur는 비교적 낮은 투자율을 특성으로 하나 지금까지 발견된 철심재료 중 2.3 T 이상의 가장 큰 포화자속밀도를 가지고 있으며 매우 높은 Curie온도(약 1200℃)를 가지고 있어 전자식 펌프의 동작온도에서 거의 온도 변화에 따른 자기적 특성의 변화가 없는 것으로 알려져 있다. 또한 중성자 조사 결과에서도 중성자 조사에 따른 자기적 특성의 변화가 거의 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 Permendur는 가격이 매우 비싸며 전량을 해외 수입에 의존하여야 하므로 확보의 어려움이 있다.

결과적으로 현재 전자식 펌프의 철심재료로 가장 적합한 것은 규소강판이

다. 규소강판은 다른 후보재료보다 확보가 쉽고 가격도 낮은 편이며 전자식 펌프의 동작온도에서 상온에서보다 떨어진 자기적 특성을 보유하고 있으나 어느 정도 사용은 가능한 정도이며 중성자 조사에 의한 자기적 특성의 변화가 거의 없는 점 등에서 우선적인 전자식 펌프의 철심재료로 사료된다.

나. 코일 도체 재료의 고온 특성 및 내방사선 특성

1) 온도변화에 따른 코일 도체 재료의 전기적 특성

앞에서 언급하였듯이 전자식 펌프는 액체금속속에서 고온 분위기에서 동작하여야 하므로 구성재료의 고온 특성이 매우 중요하다. 전자식 펌프의 구성재료 중 철심재료뿐만 아니라 코일 도체 재료도 또한 전자식 펌프의 구동력 발생과 관계가 있으며 이 재료는 특히 전기적 특성이 중요하므로 전기적 특성인 전기전도도가 고온에서도 높아야 한다.

상온에서 알루미늄나 분산강화동의 비저항은 인탈산동보다는 조금 작으며 인청동보다는 매우 작음을 알 수 있으며 온도의 증가에 대한 비저항의 증가량도 세 구리합금 중 가장 작은 값을 가진다. 그러나, 상온에서의 비저항에 대한 600℃에서의 비저항의 비는 알루미늄나 분산 강화동이 대략 3배, 인탈산동이 2.9배, 그리고 인청동이 1.3배로 알루미늄나 분산 강화동이 상온에서의 낮은 비저항으로 인하여 가장 큰 값을 가지는데 이런 성질로 인하여 상온에서보다 전자식 펌프의 목표 동작온도인 600℃에서 1차측의 저항값의 큰 상승으로 상온과 600℃에서의 효율의 차이가 비교적 클 것으로 예상된다.

그러나 600℃에서의 비저항은 인청동의 약 0.15 $\mu\Omega\text{m}$ 나 인탈산동의 약 $6.0 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$ 보다는 알루미늄나 분산 강화동이 약 $5.3 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$ 로 비저항값이 작으므로 코일 도체 재료로의 알루미늄나 분산 강화동의 사용은 인탈산동이나 인청동의 사용보다는 적은 전력 손실을 나타낼 것이므로 전자식 펌프의 코일 도체 재료를 알루미늄나 분산 강화동로 사용하면 입력전력의 감소로 더 좋은 효율을 얻을 수 있을 것으로 예견된다.

결과적으로 온도에 따른 비저항의 상승으로 전자식 펌프는 코일 재료의 사용온도가 높으면 높을수록 코일의 주열에 의한 손실이 커져서 효율은 떨어질 것이나 모든 도체가 이와 같은 성질을 가지고 있으므로 코일 도체 재료의

선택은 단순한 비저항값과 같은 전기적인 성질이외에 기계적인 성질을 고려해야 한다.

2) 중성자 조사에 대한 코일 도체 재료의 물리적 특성 변화

코일 도체 재료도 철심재료와 마찬가지로의 이유로 중성자 조사에 의한 물리적 특성의 변화의 조사가 필요하다. 물론 코일 도체 재료의 중성자 조사에 의한 물리적 특성 변화 중 중요한 것은 전기전도도의 변화이다. 또한 코일 도체 재료는 spiral형태로 제작되어 비교적 큰 힘을 받게 되며 일반적으로 코일 도체 재료는 구리합금이므로 기계적 특성의 변화도 조사되어야 한다.

코일 도체 재료로서의 구리합금류의 중성자 조사에 의한 물리적 변화 측정 실험은 핵융합 장치의 divertor나 limiter에의 사용을 위하여 미국, 일본, 유럽, 러시아 등에서 1980년대 말부터 현재까지 활발히 진행 중이다. 실험에 사용되는 중성자 발생장치는 FFTF(Fast Flux Test Facility ; 미국), EBR-II(미국), RTNS-II(Rotating Target Neutron Source ; 미국), OWR(Omega West Reactor ; 미국), SM-2(러시아), BOR-60(러시아), HFR(유럽), FMUFR(Fusion Material Utilizing Fission Reactor ; 미국과 일본) 등이다. 그 결과를 보면 고온(지금까지의 실험에서는 최고 중성자 조사 온도가 529℃) 중성자 조사에 전기전도도나 기계적 특성 등의 여러 가지 특성을 종합적으로 비교분석해 볼 때 가장 우수한 구리 합금은 알루미늄 분산 강화동으로 나타나 있다.

그림 16[42], 그림 17[43]과 그림 18[42] 그리고 표 5[44], 표 6[44]과 표 7[44]을 살펴보면 전기전도도의 경우에는 조사되는 중성자속의 증가에 따라 일반적으로 감소하는 경향을 가지는데 순수한 구리(99.999% MARZ)의 경우 400℃부근에서 30 dpa의 중성자 조사 후의 전기전도도는 조사 전의 101% IACS에서 대략 70% IACS로 떨어지며 알루미늄 분산 강화동의 경우에는 알루미늄의 함량과 열처리에 따라 차이가 있으나 대략 조사 전의 95% IACS 내에서 400℃ 부근에서 30 dpa 정도의 중성자 조사 후 대략 80% IACS 정도의 전기전도도를 나타냈다. 그러나 529℃에서는 약 30 dpa의 중성자 조사 후에는 순수한 구리와 알루미늄 분산 강화동 모두 약 85% IACS 정도의 전기전도도를 갖는 것으로 나타나 오히려 더 큰 전기전도도를 갖는다.

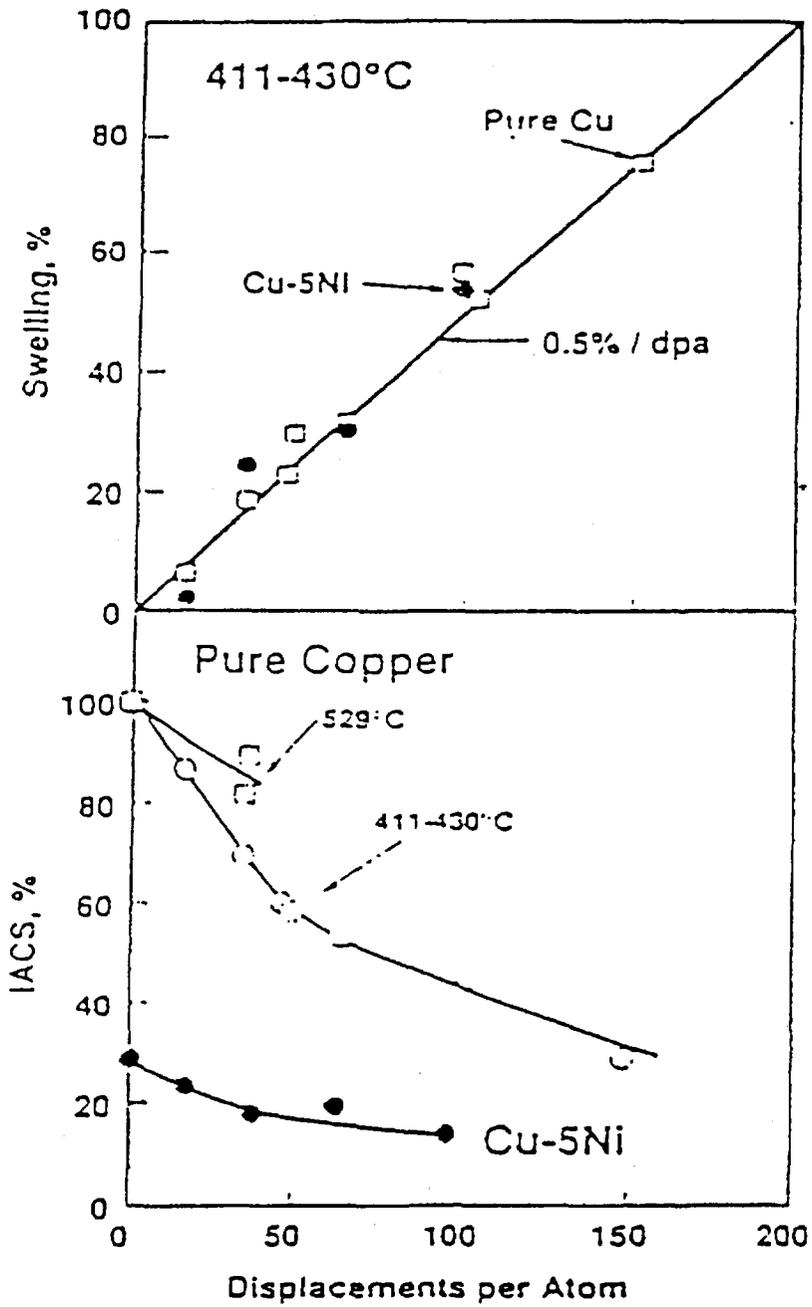


그림 16. 고순도 구리(411~430°C와 529°C)와 Cu-5wt%Ni(430°C)의 FFTF 중성자 조사에서의 Swelling과 전기 전도도의 변화

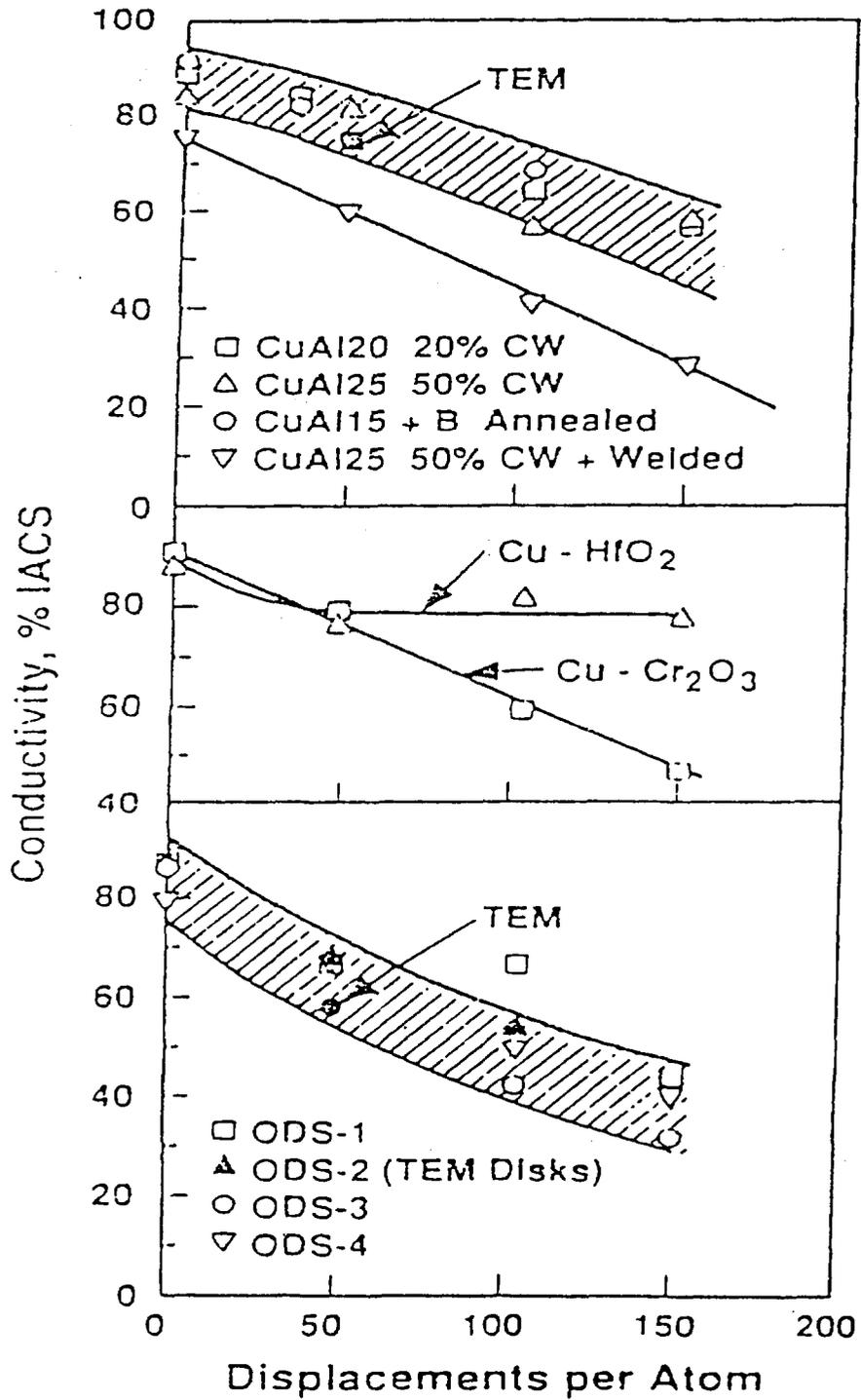


그림 17. 산화 분산 강화동의 전기 전도도에 대한 중성자 조사의 영향

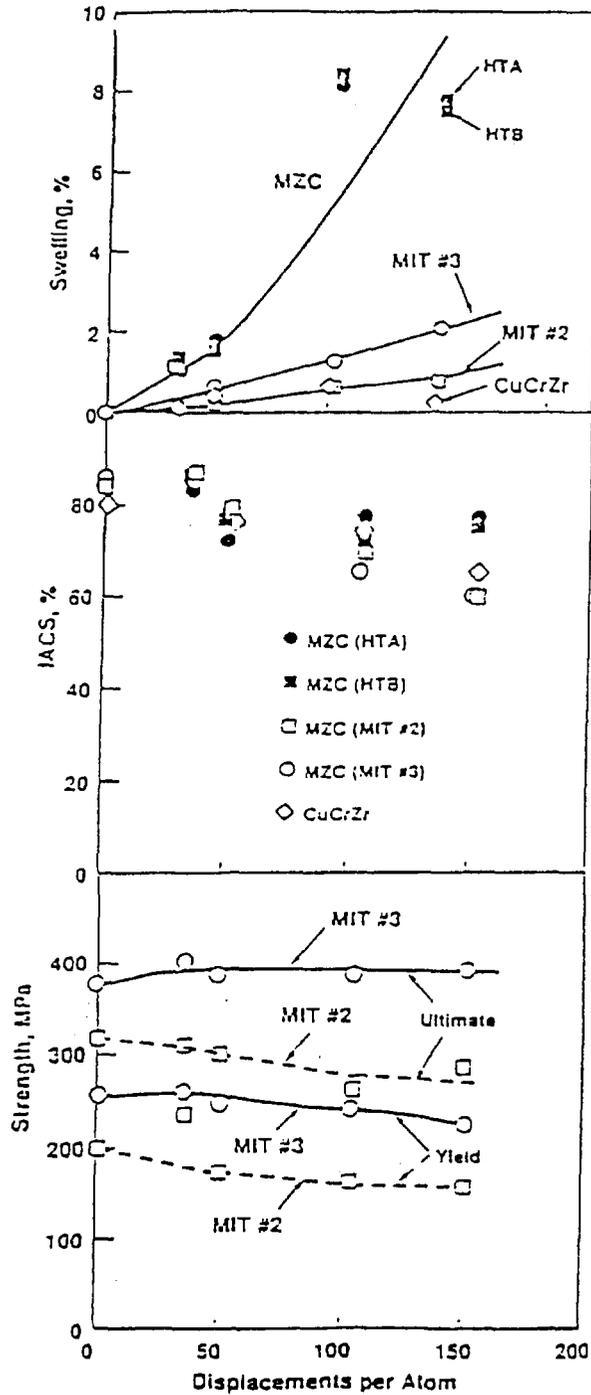


그림 18. 411~414°C에서 중성자 조사된 MZC Copper Alloy의 Swelling, 전기 전도도, Tensile Strength.

표 5. 고순도 구리의 중성자 조사에 의한 특성 변화

Material	Heat Treatment	Irradiation Conditions	% IACS	σ_y / MPa	σ_{TS} / MPa	Elongation(%)	$\Delta V/V$ (%)	Comments	
99.999% Cu (MARZ)	Annealed	Unirradiated	101.0	58	-	28.0	0.0	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1	
		16 dpa, @430 °C	88.0	43	-	14.0	6.5		
		47 dpa, @430 °C	61.1	-	-	-	22.8		
		63 dpa, @430 °C	55.0	-	-	-	31.5		
		98 dpa, @430 °C	32.7	-	-	-	55.8		
99.999% Cu (MARZ)	Annealed	Unirradiated	100.9	75	171	29.0	0.0	PNL-WHC FFTF-MOTA generation 1.5 & 2	
		34 dpa, @414 °C	70.3	64	116	10.1	15.1		
		50 dpa, @411 °C	58.1	63	131	15.0	22.7		
		150 dpa, @415 °C	30.0	-	-	-	76.0		
		32 dpa, @529 °C	86.8	-	-	-	1.8		
99.999% Cu (MARZ)	20% CW	Unirradiated	103.0	40			0.0	LANL EBR- II	
		3 dpa, @400 °C	97.0	41			1.8		
		15 dpa, @400 °C	87.0	45			6.8		
99.95% Cu (OF)	20% CW	Unirradiated	101.0	30			0.0		
		3 dpa, @400 °C	95.0	55			2.1		
		15 dpa, @400 °C	87.0	50			6.7		
99.999% Cu (OFHC)	Annealed	Unirradiated	102.0				0.0	MIT EBR- II	
		14 dpa, @400 °C	88.0				5.4		
		20% CW	Unirradiated	97.0					0.0
	50% CW	Unirradiated	14 dpa, @400 °C	86.0					8.8
		Unirradiated	14 dpa, @400 °C	102.0					0.0
		Unirradiated	14 dpa, @400 °C	88.0					5.4
99.95% Cu (110-ETP)	75% CW	Unirradiated	100.0				0.0		
		14 dpa, @400 °C	79.0				34.0		
99.999% Cu (zone refined)	Annealed	1.2 dpa, @182 °C					0.05	ORNL ORR	
		1.2 dpa, @220 °C					0.08		
		1.3 dpa, @250 °C					0.34		
		1.3 dpa, @275 °C					0.56		
		1.1 dpa, @300 °C					0.49		
		1.2 dpa, @350 °C					0.55		
		1.3 dpa, @400 °C					0.29		
		1.2 dpa, @450 °C					0.18		
		1.1 dpa, @500 °C					0.00		
99.999% Cu + 116 appm B	Annealed	1.2 dpa, @182 °C					0.03		
		1.2 dpa, @220 °C					0.36		
		1.3 dpa, @250 °C					0.59		
		1.2 dpa, @350 °C					0.56		
		1.3 dpa, @400 °C					0.39		
		1.2 dpa, @450 °C					0.06		
		1.1 dpa, @500 °C					0.07		

표 6. 석출 강화동의 중성자 조사에 의한 특성 변화

Alloy	Heat Treatment	Irradiation Condition	% IACS	σ_y /MPa	σ_{TS} /MPa	Elongation(%)	$\Delta V/V$ (%)	Comments
Cu-0.9Cr-0.1Zr-0.05Mg (MZC)	90% CW +aged	Unirradiated	83.3	450		1.8	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1
		16 dpa, @430°C	77.1	267		5.9	1.03	
		47 dpa, @430°C	59.6	-		-	0.79	
		63 dpa, @430°C	-	-		-	6.53	
		98 dpa, @430°C	-	-		-	-	
		34 dpa, @414°C	-				1.10	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1.5 & 2
		50 dpa, @411°C	-				1.63	
		104 dpa, @415°C	78.0				8.10	
		150 dpa, @415°C	78.0				7.80	
		32 dpa, @529°C	-				0.47	
104 dpa, @415°C	72.0				8.50	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1.5 & 2		
150 dpa, @415°C	76.0				7.50			
Cu-0.6Cr-0.2Zr-0.02Mg (MZC)	75% CW +aged	Unirradiated	50.0	360			0.50	MIT, EBR-II
		14 dpa, @400°C	84.0	240			0.10	Ingot route
		Unirradiated	74.0				0.00	MIT, EBR-II
		14 dpa, @400°C	78.0				0.10	Powder route
Cu-0.8Cr-0.15Zr-0.04Mg (MZC)	90% CW +aged	Unirradiated	89.0	430			0.00	LANL EBR-II
		3 dpa, @400°C	89.0	380			0.10	
		15 dpa, @400°C	92.0	285			0.10	
Cu-0.6Cr-0.13r-0.05Mg (MZC)	75% CW +aged	Unirradiated	82.0	200	320		0.00	MIT alloy made by ingot route tested at PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 2
		32 dpa, @415°C	83.0	240	310		1.20	
		50 dpa, @415°C	79.0	175	300		0.20	
		104 dpa, @415°C	70.0	155	260		0.50	
		150 dpa, @415°C	60.0	150	280		0.70	
Cu-0.5Cr-0.5Zr-0.05Mg (MZC)	Annealed +aged	Unirradiated	87.0	2630	380		0.00	MIT alloy made by powder metallurgy route tested at PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 2
		32 dpa, @415°C	86.0	265	400		0.10	
		50 dpa, @415°C	78.0	250	390		0.80	
		104 dpa, @415°C	65.0	245	390		1.40	
		150 dpa, @415°C	60.0	238	390		2.10	
Cu-0.65Cr-0.08Zr	Annealed +44% CW +aged	Unirradiated	80.0				0.00	Joint Research Centre, Ispra, alloy tested at PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 2
		32 dpa, @415°C	-				-	
		50 dpa, @415°C	76.0				-	
		104 dpa, @415°C	74.0				-	
		150 dpa, @415°C	65.0				0.20	

표 6. (계속)

Alloy	Heat Treatment	Irradiation Condition	% IACS	σ_y /MPa	σ_{TS} /MPa	Elongat ion(%)	$\Delta V/V$ (%)	Comments
Cu-0.4Cr -0.19Zr -0.06Mg	Annealed + CW + aged	Unirradiated		400		8.0		SM-2 Reactor
		10^{21} ncm ⁻² ,@100℃		500		3.0		tested at 100℃
		Unirradiated		250		7.5		SM-2 Reactor
		10^{21} ncm ⁻² ,@400℃		50		24.0		tested at 400℃
		10^{22} ncm ⁻² ,@400℃		50		15.0		BOR-60 Reactor tested at 100℃
		5×10^{21} ncm ⁻² ,@330℃					-0.28	SM-2 Reactor
		10^{22} ncm ⁻² ,@400℃					-0.15	BOR-60 Reactor
Cu-0.5Cr- 0.1Zr	Unspecified	Unirradiated		400		8.5		SM-2 Reactor
		10^{21} ncm ⁻² ,@100℃		400		4.5		tested at 100℃
		Unirradiated		290		5.0		SM-2 Reactor
		10^{21} ncm ⁻² ,@400℃		85		32.0		tested at 400℃
		10^{22} ncm ⁻² ,@400℃		90		37.0		BOR-60 Reactor tested at 100℃
		5×10^{21} ncm ⁻² ,@330℃					-0.29	SM-2 Reactor
		10^{22} ncm ⁻² ,@400℃					-0.20	BOR-60 Reactor
Cu-5Ni -2.5Ti	Solution- annealed +aged	Unirradiated	40.4	429	555	13.9	0.00	PNL-WHC
		34 dpa, @414℃	52.6	425	580	10.9	1.12	FFTF-MOTA
		50 dpa, @411℃	47.4	-	-	-	1.61	Generation 1.5
		104 dpa, @415℃	50.0	-	-	-	6.20	& 2
		150 dpa, @415℃	48.0	-	-	-	10.80	Material from
		32 dpa, @529℃	66.9	337	494	10.6	0.18	MIT
	75% CW +aged	Unirradiated	32.0				0.00	MIT EBR-II
		14 dpa, @400℃	60.0				2.40	Ingot route
	Hot extruded	Unirradiated	52.0				0.00	MIT EBR-II
14 dpa, @400℃		56.0				0.10	Powder route	
	Unirradiated	19.0				0.00	MIT EBR-II	
	14 dpa, @400℃	59.0				0.80	Flake route	
Cu-0.03P -2.35Fe -0.12Zn	Unspecified	Unirradiated	79.0				0.00	MIT EBR-II
		14 dpa, @400℃	83.0				0.50	
Cu-1.8Ni -0.3Be	20% CW +aged	Unirradiated	66.8	563		3.2	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1, 1.5 & 2
		16 dpa, @430℃	75.9	211		12.0	1.70	
		47 dpa, @430℃	53.0	-		-	14.25	
		63 dpa, @430℃	47.3	-		-	23.45	
		98 dpa, @430℃	24.1	-		-	27.25	
		34 dpa, @414℃	-	-		-	0.14	
		32 dpa, @529℃	-	-		-	0.09	

표 7. 알루미늄 분산 강화동의 증성자 조사의 특성 변화

Alloy	Heat Treatment	Irradiation Condition	% IACS	σ_y /MPa	σ_{TS} /MPa	Elongat ion(%)	$\Delta V/V$ (%)	Comment
Cu-0.48Al ₂ O ₃ (GildCop-25)	20% CW	Unirradiated	84.0	483	-	1.8	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1
		16 dpa, @430°C	73.0	396	-	5.9	0.13	
		47 dpa, @430°C	-	-	-	-	0.48	
		63 dpa, @430°C	-	-	-	-	1.30	
		98 dpa, @430°C	-	-	-	-	1.30	
	20% CW + Annealed	Unirradiated	79.0	-	-	-	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1
		16 dpa, @430°C	-	-	-	-	-	
		47 dpa, @430°C	-	-	-	-	0.13	
		63 dpa, @430°C	59.0	-	-	-	1.11	
		98 dpa, @430°C	58.2	-	-	-	2.35	
	50% CW	Unirradiated	85.5	501	556	4.3	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 2
		50 dpa, @411°C	82.4	461	481	11.5	8.55	
		104 dpa, @415°C	57.0	485	500	-	-1.00	
		150 dpa, @415°C	58.0	460	480	-	-	
		Unirradiated	75.8	145	204	13.6	0.00	
	50 dpa, @411°C	58.7	73	143	13.1	-0.30		
104 dpa, @415°C	42.0	50	70	-	-			
150 dpa, @415°C	29.0	45	65	-	-			
Cu-0.38Al ₂ O ₃ (GildCop-20)	Annealed	Unirradiated	-	-	-	-	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1.5 and 2
		34 dpa, @414°C	-	-	-	-	0.22	
		32 dpa, @529°C	-	-	-	-	0.70	
	20% CW	Unirradiated	88.5	475	500	3.6	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1.5 and 2
		50 dpa, @411°C	74.5	376	397	14.1	-	
		34 dpa, @414°C	83.5	378	411	9.9	0.31	
		32 dpa, @529°C	85.2	388	441	14.7	0.61	
		104 dpa, @415°C	64.0	370	410	-	0.80	
		150 dpa, @415°C	57.0	370	390	-	0.00	
		Unirradiated	-	-	-	-	0.00	
	34 dpa, @414°C	-	-	-	-	0.30		
	32 dpa, @529°C	-	-	-	-	0.56		
	70% CW +Stress Relieved	Unirradiated	94.0	340	-	-	0.00	LANL EBR-II
		3 dpa, @400°C	90.0	360	-	-	0.80	
		15 dpa, @400°C	88.0	350	-	-	0.90	
	Cu-0.29Al ₂ O ₃ (GildCop-15) +200 ppm B	Annealed	Unirradiated	91.6	274	359	15.50	0.00
50 dpa, @411°C			74.3	-	-	-	1.96	
34 dpa, @414°C			81.8	295	372	15.30	1.17	
32 dpa, @529°C			87.2	-	-	-	0.62	
104 dpa, @415°C			68.0	-	-	-	3.20	
150 dpa, @415°C			-	-	-	-	3.90	
Unirradiated			87.0	400	-	-	0.00	PNL-WHC FFTF-MOTA Generation 1
3 dpa, @400°C	83.0	410	-	-	1.10			
15 dpa, @400°C	81.0	380	-	-	0.60			

그리고 특이한 것은 전기전도도면에서 불 때 몇몇 석출강화동의 경우에는 조사되는 중성자량의 증가에 따라 어느 정도(약 30 dpa)의 양까지는 전기전도도가 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이는 구리합금이 몇 가지 있다. 특히 MZC 구리 합금의 경우, 75% CW + aged Cu-0.6Cr-0.2Zr-0.02Mg에서는 조사 전 전기전도도가 59% IACS이나 400°C 14 dpa 조사 후에는 84% IACS로 매우 큰 증가를 나타내었다.

위와 같은 중성자 조사에 의한 구리합금의 전기전도도의 변화는 점결점(point defect), 변위망(dislocation network), 기체로 찬 틈(gas-filled void)과 핵종변환 부산물의 형성에 의한 것으로 알려져 있다. 이 중 중성자 조사에 의한 전기전도도의 변화의 가장 큰 영향을 주는 것은 많은 양이 생겨나는 핵종변환 부산물인 Ni, Zn의 발생이다. 즉, 중성자 조사량의 증가에 따른 핵종변환 부산물 Ni, Zn 발생은 전기전도도의 저하를 일으킨다. 이 핵종변환 부산물의 증가는 다음과 같은 구리합금에서 구리에 다른 원소가 첨가된 구리합금의 비저항의 이론적인 계산식에서 보듯 구리합금의 비저항의 증가를 나타낸다.

$$\rho = \rho_0 + \chi_{Ni} Y_{Ni} + \chi_{Zn} Y_{Zn}$$

ρ_0 : 구리의 비저항(electrical resistivity of copper)

x : 용질 원소의 몰 분율(mole fraction of solute element)

Y : 용질 원소의 고용체 비저항 상수(solid solution resistivity constant of the solute element)

그리고 529°C에서의 400°C에서 보다 줄어든 전기전도도의 감소는 529°C에서 생겨나는 핵종변환 부산물이 주로 Ni, Zn이며 다른 원소들의 생성은 매우 줄어든 결과를 보이며 이 원소들의 Y 값이 다른 원소들보다 매우 작은 값이기 때문이다.[44]

그림 17, 그림 18 및 그림 19[43]와 더불어 표 5, 표 6과 표 7에 나타난 구리와 구리합금들의 고온 중성자 조사 후의 기계적 특성의 변화에 대하여 살펴보면 일반적인 특징으로 중성자 조사에 의한 swelling 현상과 재료가 조사 전보다 훨씬 단단해져 매우 부스러지기 쉬운 상태가 되는 것을 알 수 있다.

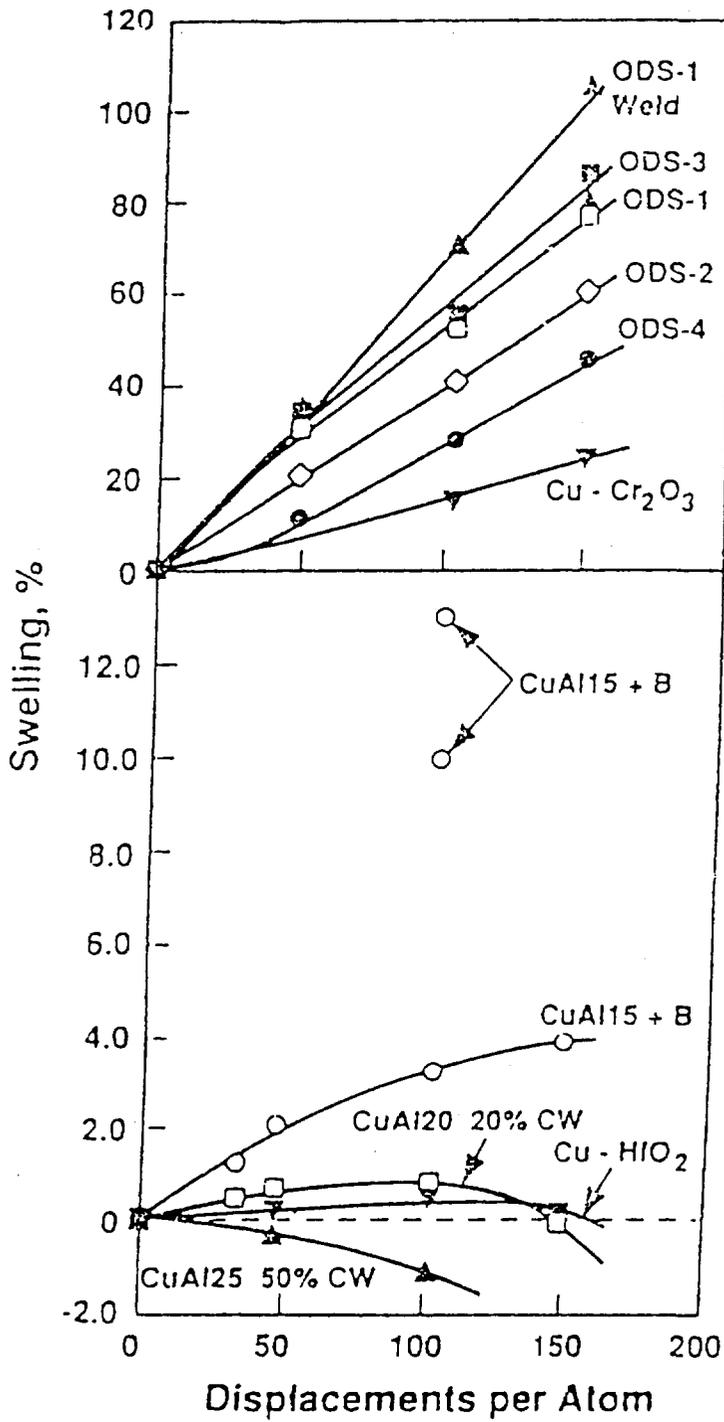


그림 19. 산화 분산 강화동의 중성자 조사에 대한 Swelling의 영향

400℃ 부근에서 30dpa의 중성자 조사 후의 부피변화율을 보면 순수한 구리(99.999% MARZ)의 경우에는 약 15%, 알루미늄 분산강화동의 경우에는 알루미늄의 함량이나 열처리 상태에 따라 0.3%에서 1.1%까지의 범위에 있으며 석출강화동(MZC Copper Alloy)의 경우 대략 1.1%에서 1.5% 정도의 값을 나타내고 있다. 그러나, 529℃에서는 전기전도도의 변화에서와 마찬가지로 같은 양의 중성자 조사 후의 부피변화율은 세 종류의 재료 모두에서 훨씬 더 작은 값의 부피변화율을 가지는 향상된 특징을 나타내고 있다(99.999% MARZ : 1.8%, 알루미늄 분산강화동 : 0.5-0.7%, MZC Copper Alloy : 0.5%). Yield Strength의 변화를 보면 약 400℃, 30dpa의 방사선 조사 후 99.999% MARZ는 약 60MPa, 알루미늄 분산강화동은 약 350MPa, MZC Copper Alloy는 250MPa로 나타나 있다.

중성자 조사에 따른 기계적 특성의 변화 원인도 전기전도도의 변화 원인과 비슷하게 여러 가지 변이손상들과 핵종변환 부산물의 생성 때문이다. 우선 핵종변환 부산물의 생성은 구리와 핵종변환 부산물과의 원자반경의 불일치로 인하여 탄력성의 감소와 더불어 합금의 강도를 증가시키는 인력에너지를 발생시킨다. 이 핵종변환 부산물들의 용해 한계량이 넘어서면 국부적인 열역학적이고 동력학적인 요소가 작용하게 되는데 이 때에는 인성의 큰 감소와 더불어 합금이 더욱 강화된다. 그리고 수소와 헬륨 같은 기체 부산물의 생성은 부피의 증가와 더불어 구리합금의 특성에 해로운 영향을 가져온다. 변이손상에 의한 점결점은 역시 확산운동에 의하여 물질의 특성 변화에 영향을 주며 변이손상은 크립, 확산질량전이, 재결정(recrystallization)과, 조직 성장(grain growth) 등과 같은 열적으로 활성화된 과정들을 허용하여 구리합금의 특성 변화를 더욱더 증가시킨다. 그리고 복잡한 변이구조(dislocation structure)의 형성 또한 구리합금의 중성자 조사에 의한 특성 변화의 원인이 된다.[44]

3) 풀침지형 전자식 펌프의 코일 도체 재료의 선택

풀침지형 전자식 펌프는 앞서도 설명하였듯이 고온(600℃)에서 동작되며 고에너지를 가진 고속중성자의 조사도 받게 되므로 풀침지형 전자식 펌프의 코일 도체 재료는 이러한 상황에서도 믿을 만한 기계적, 전기적 특성을 지니고 있어야 한다.

고온과 중성자 조사 상황에서의 기계적, 전기적 특성에서의 후보재료들을 종합적으로 분석하여 보면 가장 적합한 재료는 알루미늄 분산강화동으로 사려된다. MARZ나 무산소동 같은 다른 원소가 거의 포함되지 않은 구리류에서는 전기전도도면에서는 우수한 특성을 보유하고 있으나 기계적 특성의 고온과 중성자 조사에서의 현저한 감소로 인하여 사용의 어려움이 야기될 것이며 MZC 같은 석출강화동도 앞의 불순물이 적은 구리에서와 비슷한 특성을 가지며 몇몇 구리합금은 기계적 특성은 우수하나 낮은 전기전도도로 인하여 코일 도체 재료로의 사용에 적합하지 않다. 그러나, 알루미늄 분산 강화동은 고온과 중성자 조사에서 믿을 만한 기계적 특성을 보유하고 있으며 전기전도도에서 불순물이 거의 없는 MARZ나 무산소동과 거의 같은 값을 가지고 있으므로 고온 상황에서 사용되며 많은 고속중성자의 조사를 받을 전자식 펌프의 코일 도체 재료로의 사용에 적합하다.

다. 전기 절연재

폴침지형 전자식 펌프의 전자석 코일 절연을 위하여 사용되는 절연재는 앞에서 설명한 철심재료나 코일 도체 재료와 마찬가지로 고온 사용과 중성자 조사에서의 전기적 절연특성이나 기계적 특성의 변화가 적어야 한다. 그런데 현재까지 사용되고 있는 전자석 코일의 절연재는 유기물 절연재로서 사용 가능 온도가 최고 400°C(KAPTON의 경우)이므로[45] 동작 온도가 500°C 이상인 폴침지형 전자식 펌프에서의 신뢰성을 가질 수 있는 600°C까지에서는 절연성의 유지를 확신할 수 없다. 또한 유기물 절연재는 중성자 조사에 의한 절연특성의 파괴도 심각하게 일어난다. 이 온도에서와 중성자 조사에서 절연특성이 믿을 만하게 유지되는 물질은 주로 마이카, 알루미늄, 질화알루미늄, SiC 등과 같은 무기물 절연재이다. 현재 핵융합 장치에서의 안테나, waveguide 등의 절연재로서 현재 알루미늄, 질화알루미늄, SiC, MgAl₂O₄와 같은 물질들의 중성자 등의 방사성 조사의 실험이 진행 중이며 현재까지의 결과를 살펴보면 중성자 조사에 대하여 믿을 만한 절연특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다.

그런데 무기물 절연재들은 전자석 코일 절연재로서 필요한 유연성이 부족하여 전자석 코일의 절연재로는 현재 상태에서는 사용이 불가능하다. 이러한 이유로 현재 무기물 절연재의 고온에서 사용되는 전자석 코일에서의 적용을 위하여 많은 연구가 진행 중이다. 그 예로 현재 일본에서 진행 중인 절연 테잎

에 무기 고분자 물질을 발라가며 도체를 감아서 고온에서 소결시켜 pan-cake 형태로 제작하는 방법[46]과 마이카나 알루미나와 같은 무기질과 레진, NEXTEL, KAPTON과 같은 유기질과의 결합[45,47,48]에 의한 새로운 고온 절연재의 개발이 진행 중이나 현재의 단계에서는 코일의 권선수가 작은 경우에 한하여 시험 사용 중이다. 따라서 풀침지형 전자식 펌프의 제작에 사용될 전자석 코일의 고온 절연재의 개발이 시급하게 요구된다.

3. 타당성 평가

3.1 기능성

471MWt 용량인 ALMR(PRISM Mod-A)의 원자로 모듈에는 일차 순환 펌프로써 침지형 전자식 펌프 4기가 원자로의 소듐에 담겨져 있다. 펌프의 모습은 그림 4와 같다. 각각의 펌프의 직경은 약 1.1m이고, 높이는 12.0m, 무게는 약 22.5t 가량 된다. 이 펌프의 용량은 $43.5\text{m}^3/\text{min}$ 으로 자체 냉각 방식의 환단면 선형유도 펌프이다. 펌프의 parameter들을 표 8에 나타내었다.

3000MWt 용량인 프랑스의 Super-Phenix에서 사용하는 대용량의 기계식 일차 냉각펌프는 직경이 약 2.5m, 펌프의 무게는 전동기를 포함하여 120t으로서 PRISM과 마찬가지로 4기의 1차 펌프가 원자로 내에 설치되며, MDP의 전자식 1차 펌프의 경우는 약 20t으로서 전자식 펌프가 비교적 경량의 펌프이므로 내진설비를 갖춘 구조물 설계시 유리할 것으로 평가된다.(표 9)

전자식 펌프가 기계식 원심 펌프에 비하여 가지는 장점으로, 기계적으로 움직이는 회전부가 없으므로 기기의 고장율이 적어 신뢰도(reliability)가 높으며, 펌프의 무게가 기계식 원심 펌프에 비하여 가벼우므로 내진설계시 설계가 용이하고, 기계식 펌프를 사용할 때 원자로 용기 상부 공간을 점유하는 펌프 구동 모터가 없으므로 밀봉된 원자로 내부에 설치 가능하다는 점 등을 들 수 있다.

또한 전자식 펌프는 장치 자체의 고유한 단순성과 기계적 구동 부품이 필요치 않아 펌프를 단순화시켜 순환계 규모를 획기적으로 간소화할 수 있으며, 임의의 장소에 설치하여 운전할 수 있는 자유도가 커서 원자로 용기 및 순환 배관 설비를 소형화할 수 있다. 또한 정비시 배관 계통을 개봉하지 않아도 되는 편이성이 있으며 원자로 내에서 반응도에 미치는 영향을 극소화시켜 원자로의 안정성을 높일 수 있다.

그러나 전자식 펌프는 자체의 기계적 관성이 없으므로 펌프가 정지되었을 때 잔열제거를 위한 감소유량(Coastdown)을 얻기 위한 보조장치가 필요하며,

표 8. ALMR 1차 소듐 전자식 펌프의 parameter

Pump Type	Self Cooled Annular Linear Induction Pump
Flow rate (m ³ /min)	43.5
Developed Head (psi)	115
Sodium Inlet Pressure (psia)	≥11.9
Sodium Inlet Temperature (°C)	336
Line Voltage (Volts, rms)	521
Phase Current (amps)	1224
Frequency (Hz)	15.6
Power In (kW)	1187.4
Efficiency (%)	48.4
Stator Poles	8
Total Slots/Coils	96
Slots/Pole/Phase	4
Magnetic Length (m)	4.78
Stator Iron O.D. (m)	0.74
Stator Iron I.D. (m)	0.36
Stator Current Density (amps/m ²)	1.236

표 9. 노형별 주냉각펌프 비교

항 목	Super-Phenix I	PRISM	MDP
열출력(MWt)	3,000	471	840
원자로 용기 크기			
직경(m)	21.0	5.7	9(14.4)
높이(m)	17.3	12.0	16.1
펌프의 수/원자로	4	4	4
펌프의 외형 크기			
길이(m)	14	12.3	6.21
직경(m)	2.5	1.1	1.68
펌프의 무게(ton)	82	-	-
모터 포함			
길이(m)	22	-	-
무게(ton)	120	22.5	20
펌프의 용량(m ³ /min)	290	43.5	75
펌프의 헤드(MPa)	0.53	0.8	0.61

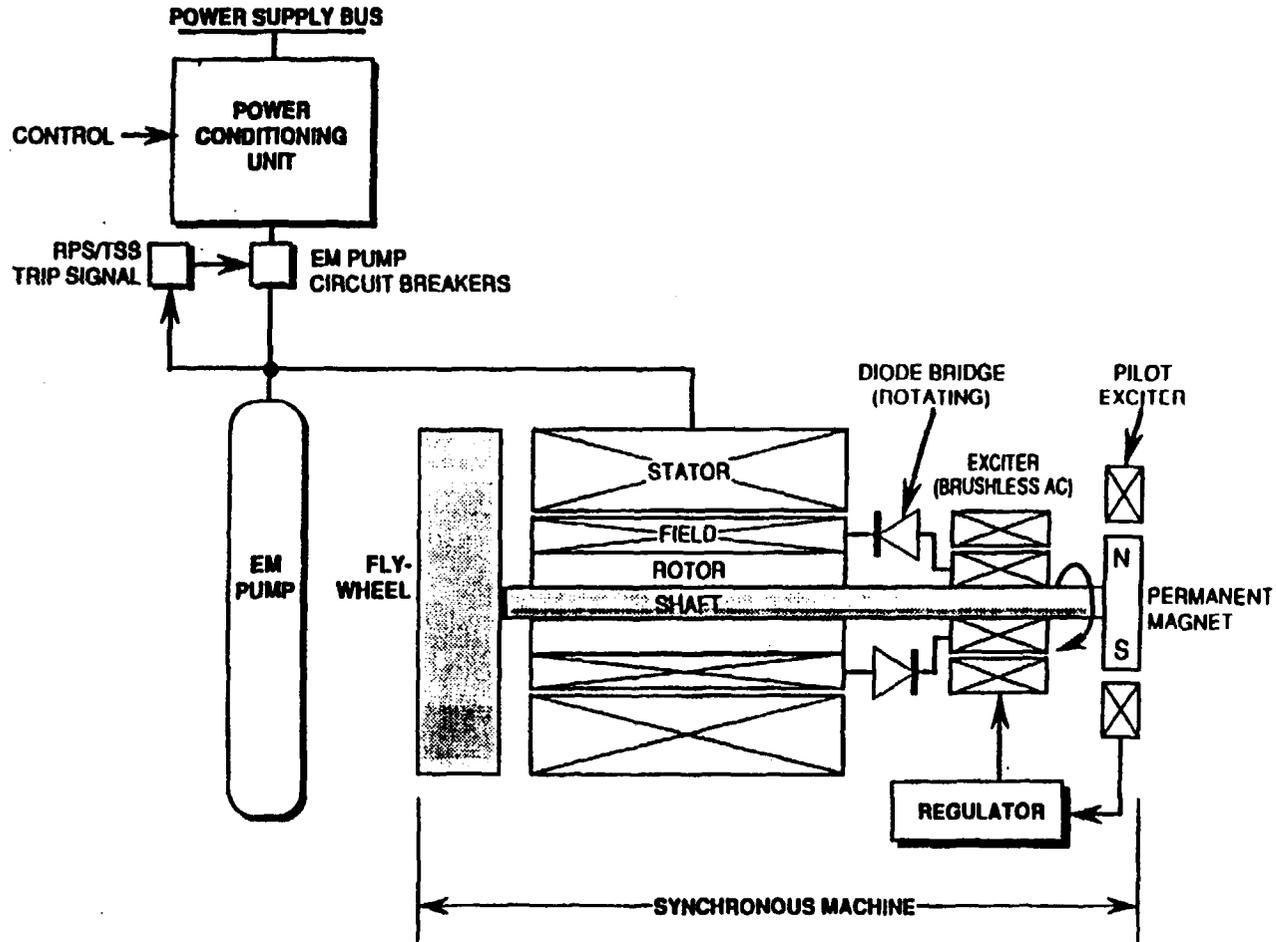
펌프 역류 유량이 커지는 단점이 있다. 기계식 펌프는 제작 및 운전 경험이 풍부하고 대용량화 하는데 따른 특별한 문제점이 없으나 전자식 펌프는 고온에서의 대용량화를 위한 R&D가 필요하다. 또한 전자식 펌프는 대용량화할수록 효율이 떨어지는 점을 극복해야한다. 그러나 최근의 액체금속로 개발 방향은 소형의 모듈화된 밀봉형 원자로에 집중되고 있으며, MDP의 1, 2차 냉각재 순환 펌프와 PRISM의 1차 펌프로써 전자식 펌프를 사용하는 이유가 여기에 있다고 판단된다.

액체금속로의 1차 냉각재 순환 펌프가 구비하여야 되는 펌프의 head는 노형에 따라 다르나 1차 구동 펌프의 정상운전시 필요한 head는 약 7~8기압이므로 액체금속로는 10기압으로 설계하는 것이 일반적이다. 표 1과 표 9에 있는 PRISM Mode A 노형의 유동 경로에서 발생하는 압력강하를 검토하면 정상운전 상태에서 $43.5\text{m}^3/\text{min}$, 8기압의 head가 필요하다. 전자식 펌프의 유량을 유지하며 head를 높이려면 길이가 더 길어져야 하므로 설계조건에 제약이 있을 수 있다.

기계식 펌프의 설계 가능한 head는 약 14기압 정도로서[10] 액체금속로의 노심 압력 강하의 측면에서 보면 기계식 펌프가 설계조건을 더 잘 만족시킬 수 있다.

3.2 운전성

기계식 펌프는 보조장치로서 펌프 모터 냉각장치와 모터축 윤활 계통 및 펌프축 정화장치 등이 필요한 반면, 전자식 펌프에는 누전(漏電) 검출기와 Cooldown을 위한 동기장치가 필수적이다. 펌프 운전시에는 이러한 보조장치들이 항상 가동되어야 하는데, 전자식 펌프의 동기장치의 운전방법은 다음과 같다. 발전소 정상 운전시에는 전자식 펌프와 병렬로 연결된 동기장치의 모터로 flywheel을 회전시킨다. 외부전원 상실 등의 전자식 펌프에 주전원이 차단되는 상황이 발생하면 동기장치는 flywheel이 가지는 관성에너지를 이용한 발전기 역할을 수행하여 전자식 펌프에 전력을 공급하는 기능을 한다. 그림 20에 나타낸 것이 전자식 펌프와 병렬로 연결된 ALMR의 유량감소 동기장치(Synchronous Cooldown Machine)의 개념도이다.



81-370.65

그림 20. Synchronous Coastdown Machine의 개념도

동기장치의 flywheel은 원하는 감소유량을 얻을 수 있도록 설계되어야 하며, 시간에 따른 유량의 profile은 원자로 긴급정지(scram) 시에 노심정지중 열충격을 최소화하고 냉각재 유량 손실 사고시에 과온을 방지하기 위한 충분한 유량을 확보하도록 설정되어야 한다. 그림 21에 나타낸 것이 ALMR에서의 Cooldown시의 유량 profile이며, 이때의 전자식 펌프의 특성을 그림 22에 나타내었다.

그림 21에서와 같이 전자식 펌프는 Solid-State 전원공급장치로 입력전압에 따라 자장이 변하여 직접적으로 펌핑력이 결정 되므로 보조장치 없이 설계 용량의 전체 영역(0~100%)에서 안정적인 제어가 가능한 반면, 기계식 펌프는 드로틀 밸브를 사용하거나 구동 모터의 회전수를 조절하여야 하므로 조절에 한계가 있어 다단식(multistage)으로 설계하는 것이 불가피하여,[10] 저유량 운전을 위하여 pony motor를 따로 부착하므로 출력 제어장치가 크다.

3.3 안전성

냉각재 순환 펌프와 관련된 안전성의 문제는 비교 대상 설계 개념의 특성과 깊은 관련을 가진다. 기계식 펌프는 회전축의 seal에 소듐이 직접 접촉할 때 생기는 문제를 해결하기 위하여 펌프 위쪽에 cover gas 공간이 존재하는 형태의 수직축 원심펌프를 많이 사용한다. 이러한 구조에서는 펌프 내부에 cover gas와 소듐 사이의 자유액면이 존재하므로 여기서 cover gas가 냉각재로 유입될 수 있다.

즉, 기계식 펌프는 자유액면의 요동에 의하여 가스 혼입이 일어나고 이때 발생된 void는 소듐의 흐름을 따라 core로 유입되게 된다. 액체 소듐에서는 일반 유체에서와 달리 한번 생성된 void는 계속 증가함으로 알려져 있으며, 이러한 void의 전파에 의하여 reactor core의 용융 현상을 일으키는 잠재적인 위험요소가 될 수 있다.

그러나, 1차 냉각계통에 전자식 펌프를 채용하면 기계식 펌프에서와 같은 seal의 문제를 근본적으로 해결할 수 있다. 따라서 펌프 내부에 액체 소듐과 커버 가스의 자유 액면이 존재하지 않게 되므로 기계식 펌프의 운전 중에 생길 수 있는 gas bubble의 노심 내 유입가능성을 제거할 수 있다.

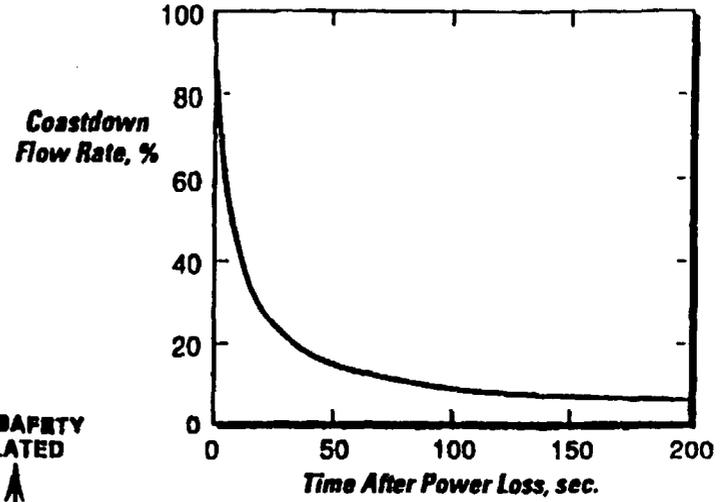
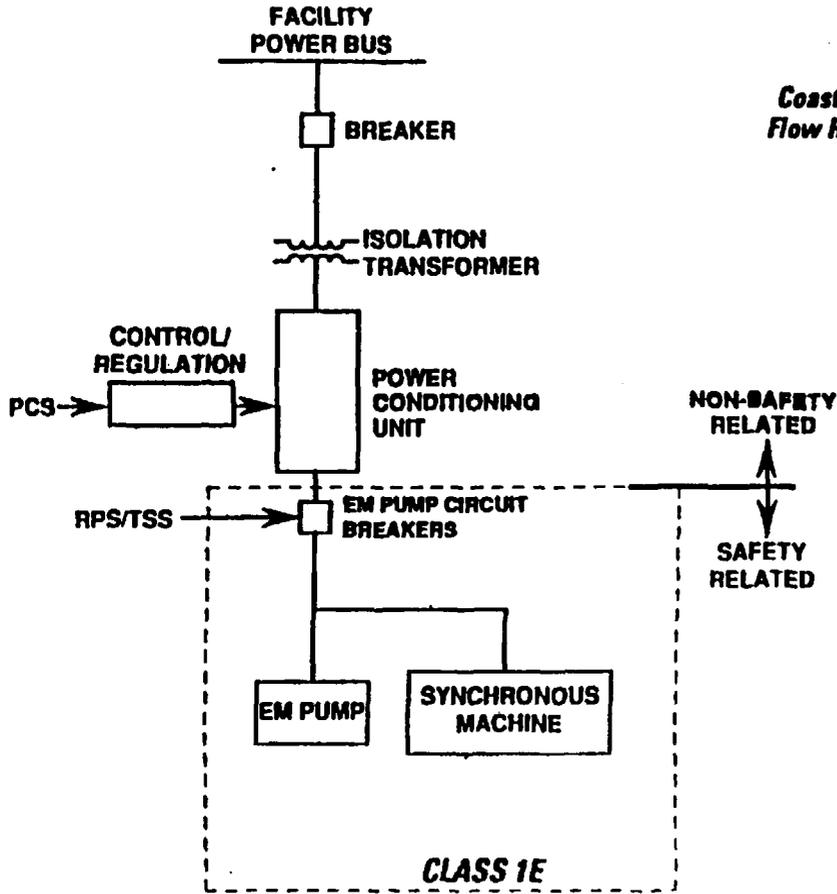


그림 21. 전자식 펌프 전원공급계통 및 Coastdown Performance

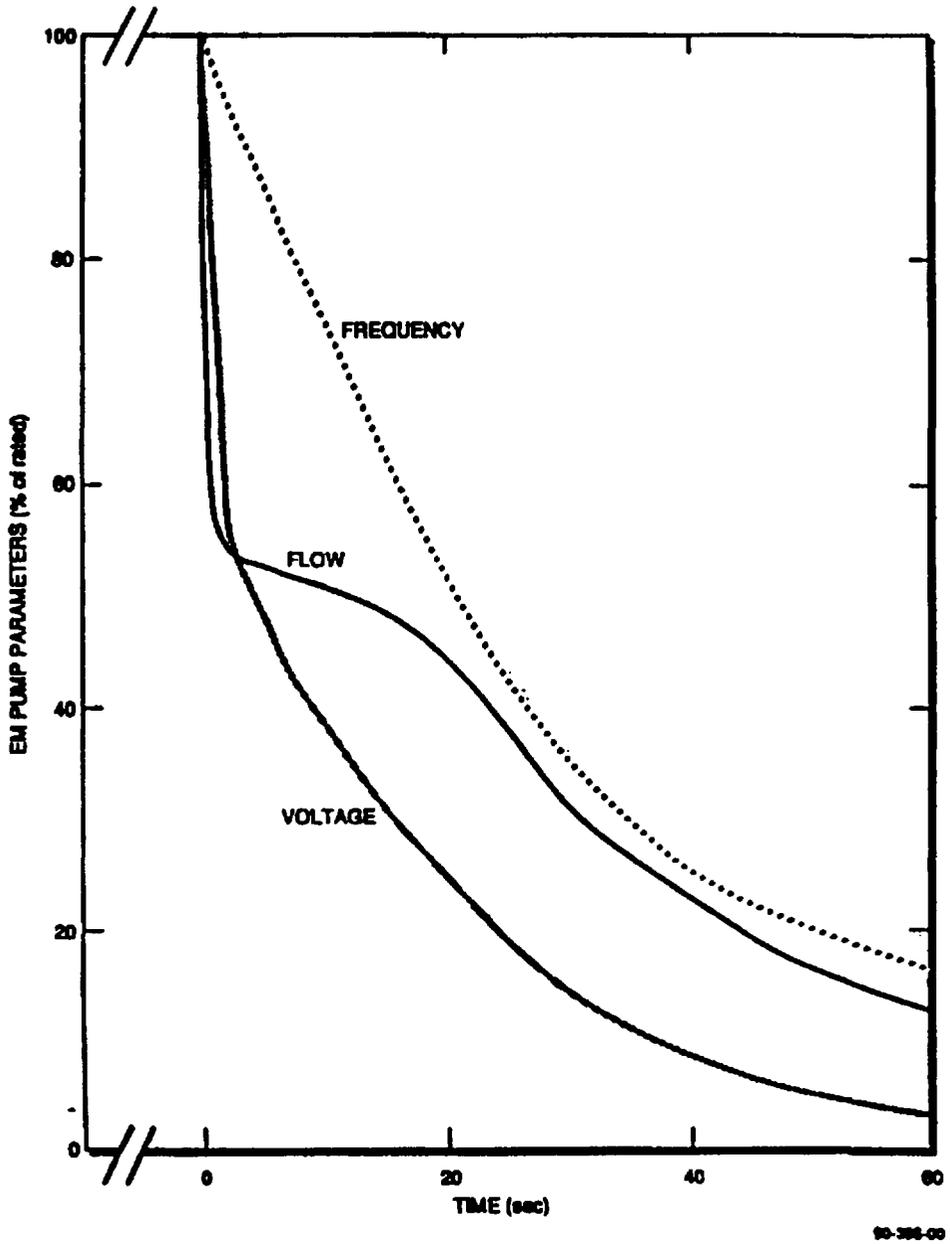


그림 22. Coastdown이 일어날 때 전자식 펌프의 특성

앞서 언급한 바와 같이 전자식 펌프에서는 외부에 병렬로 연결된 동기장치를 이용하여 펌프가 trip되었을 때에는 이러한 동기장치가 작동하여 유량의 Coastdown을 확보할 수 있도록 설계되었으므로, ULOF/LOHS(Unprotected loss of flow and heat sink)와 함께 1차 펌프들 중 일부 펌프의 고장이 일어나는 경우를 고려해야한다. 이 경우는 NRC Category III event에 해당하는 사고 유형이다.

Pool 내부에 있는 총 4대의 1차 펌프 중 1대가 고장을 일으켰다고 가정하면, 나머지 3대의 펌프는 정상적으로 유량의 Coastdown을 일으키므로 약간 감소된 유량이 코아에 흐르게 될 것이다. 전자식 펌프는 정지시 펌프 내부에서의 유체 압력 손실이 작으므로 다른 건전한 펌프의 순환유량 중 일부가 정지된 펌프를 통하여 우회하는 역류 현상이 발생하고, 따라서 코아에 흐르는 유량이 감소할 것이다. 그렇지만 이러한 역류 현상으로 인하여 1차 냉각재 계통에서의 압력강하가 감소되므로 가동되는 동기장치의 flywheel의 운동에너지 소모율도 작아져서 정상작동되는 펌프의 Coastdown이 연장되므로 유량 Coastdown은 차이가 별로 없게 된다. 그림 23은 전자식 펌프를 사용하는 reactor에서 ULOF/LOHS가 일어났을 때이고, 그림 24는 앞의 조건과 함께 동기 장치 1대가 고장을 일으킨 경우의 power 및 코아에서의 유량의 감소를 나타낸 그래프이다. 시간 100초에서의 core flow 값이 전자식 펌프가 4대 모두 작동할 때는 약 13%이지만, 1대가 고장난 경우는 약 11%로 약간 적다. 이는 앞에서 설명한 이유로 해석가능하며, 그림 23, 24를 비교하면 전체적으로 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

전자식 펌프는 높은 압력 수두를 얻기 위하여 펌프의 길이가 매우 길다. ALMR인 경우 유로 출구와 입구의 간격이 6m 정도로 매우 긴 반면 기계식 펌프는 출구와 입구가 인접하여 있다. 이와 같이 전자식 펌프에서 요구되는 긴 길이는 pool 내부와 같이 한정된 공간에 전자식 펌프를 설치할 경우 pool 내부의 기기 배치에 제약점으로 작용하기도 한다. 예로서 GE의 ALMR의 경우, 원자로의 낮은 수위(하부에 위치)에 있는 IHX의 출구에서 전자식 펌프의 상부에 있는 유로 입구에 흡입되어 6m정도의 긴 펌프 내부를 통하여 유로출구로 나오고 이 유로가 노심 하부 플레넘에 연결된다. 즉 IHX에서 나온 소듐은 긴 역U자형 배관으로 흘러 노심으로 유입된다. 이와 같은 배관은 정상 운

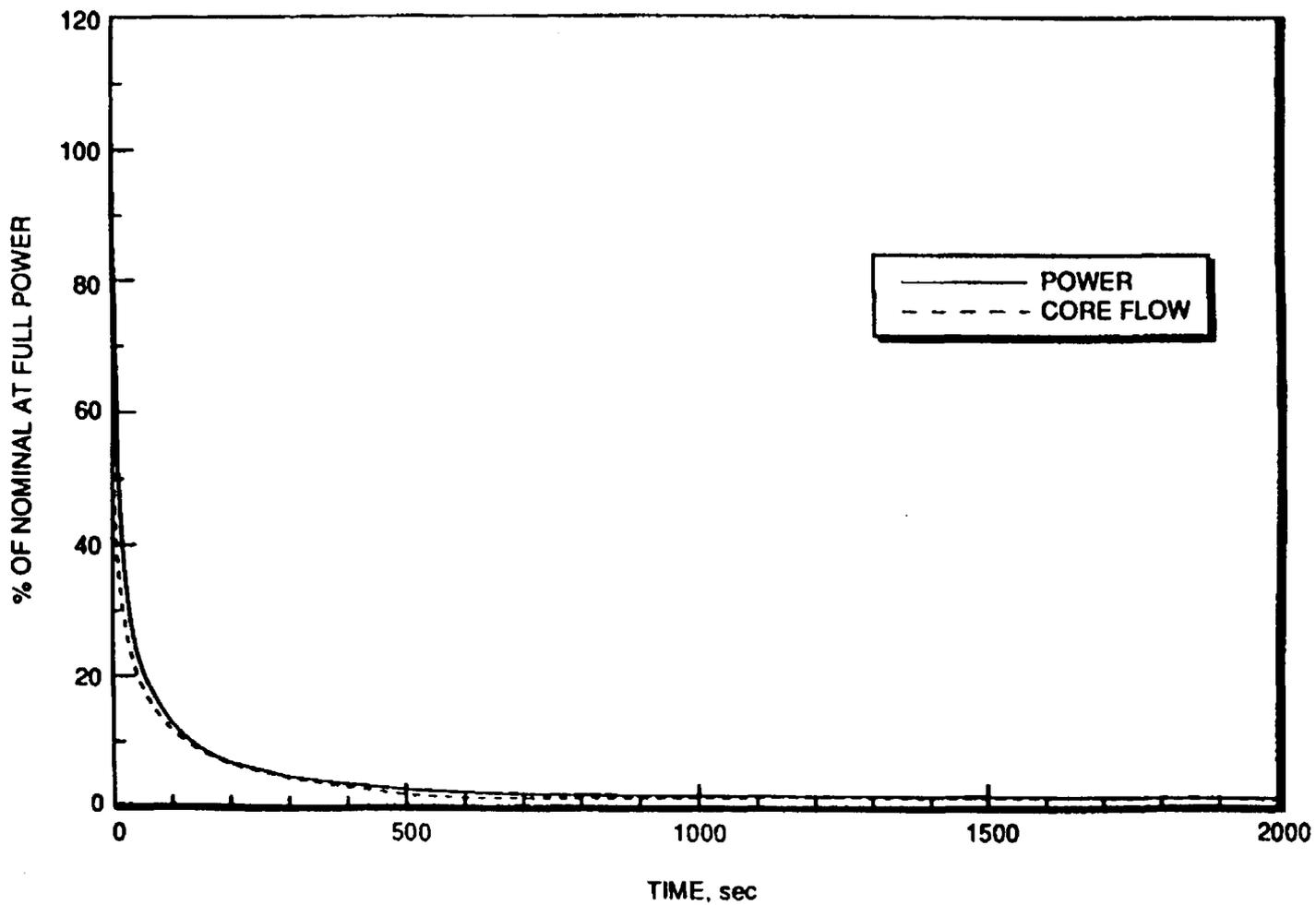


그림 23. Unprotected Loss of Flow and IHTS Heat Sink, Cooldown on Four EM Pumps: Power and Flow

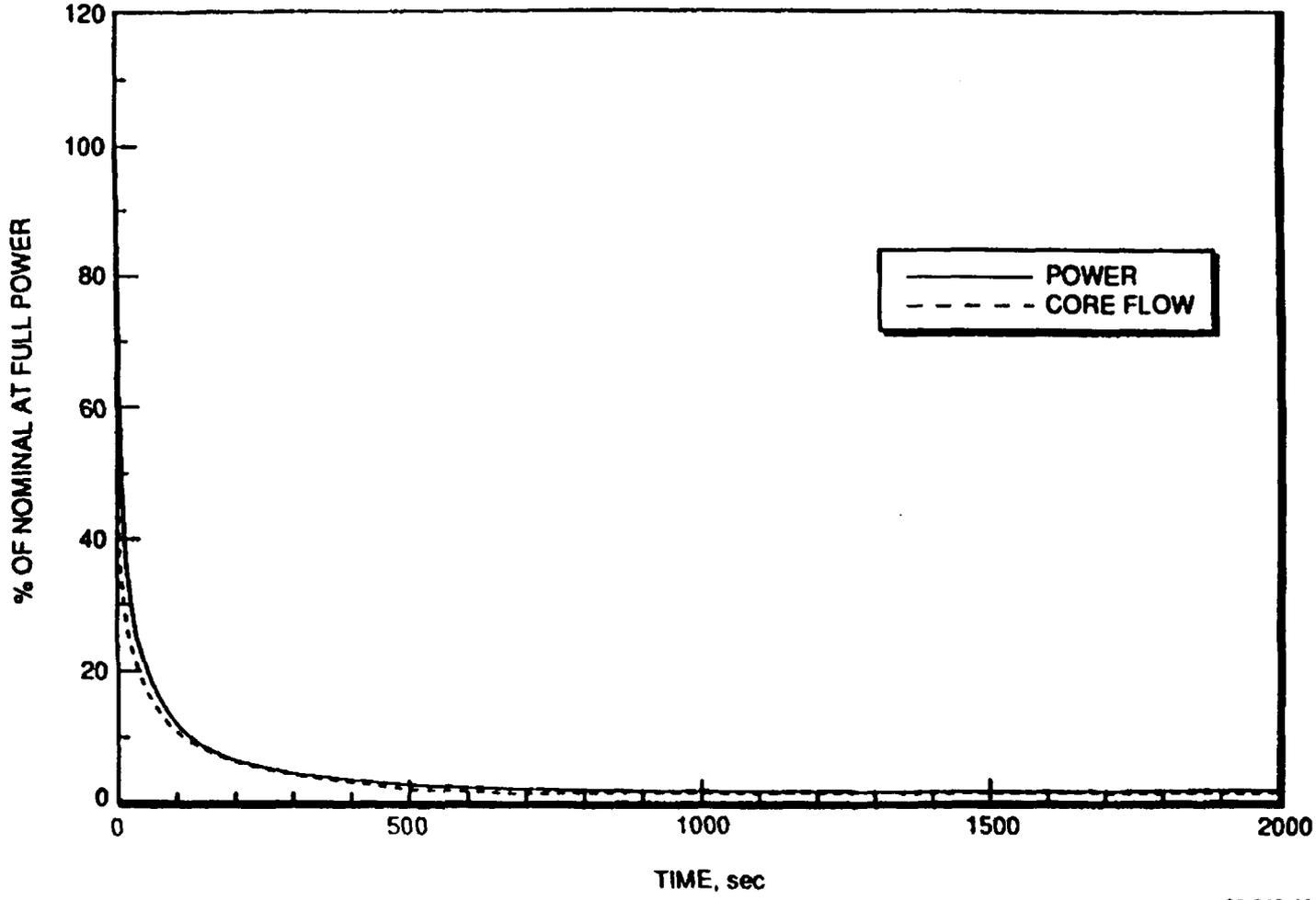


그림 24. Unprotected Loss of Flow and IHTS Heat Sink,
Coastdown on Three EM Pumps: Power and Flow

전시에는 문제가 없지만 비정상시 자연순환에 의해 잔열이 제거되는 모드에서는 냉각재 속에 포함된 가스들이 역U자형 배관 상부에 모여 자연순환 능력을 감소시킬 가능성이 있다.

3.4 제작성

기계식 펌프는 제작 경험이 풍부하고 운전 사례가 많으나, 전자식 펌프는 아직 대용량이 개발되어 있지 않으며, 특히 침지형 전자식 펌프의 경우는 고온의 작동 환경에서 오랜기간 작동시에 절연체의 내구성에 대한 보완이 필요하다.

전자식 펌프에서 core는 coil과 함께 외부 전류에 의해 펌프 추진력을 발생시키는 전자석의 일부를 구성한다. 따라서 큰 자기장을 발생시키기 위해 core 재료는 투자율이 커야 하고, 또 고온의 액체 소듐과 인접하므로 고온에서 자기적 특성을 잃지 않도록 Curie 온도가 높은 강자성체 재료를 택해야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 것으로써 코발트와 철의 합금을 사용한다. 한편 이러한 core 재료는 얇게 판형으로 잘라서 적층하여 core를 형성함으로써 eddy current에 의한 Joule열 손실을 줄일 수 있다. 이 때 적층된 판 사이의 절연 재료는 고온(850℃)의 공기 중에서 8시간 이상 열처리한 운모판(mica)을 사용한다.

전자석 coil은 고온에서 단락되지 않도록 절연시켜 감는다. 이 때의 절연 방법은 우선 무산소동선을 SS 또는 Ni합금으로 피복(내열용 clad라 부름)한 후에, 석영포, 세라믹 테이프 등을 다시 입혀 절연시키는데 이러한 경우 냉각 장치 없이도 고온(600℃)에서 사용할 수 있는 잇점이 있다.

침지형 전자식 펌프는 펌프의 핵심인 duct와 전자석 부분은 기본적으로 배관 장착형과 동일하고, 풀 속에 잠겨서 액체 소듐을 끌어 올려야 하므로 펌프 입구 부분에서 소듐을 흡입할 수 있도록 받침대가 pool의 밑바닥에 닿아 열려 생기는 공간으로 흡입구가 형성되며, 펌프를 둘러싼 풀의 소듐으로부터 열을 차단하기 위한 단열 부분이 추가되어 있으며 냉각 방식이 약간 다르다. 배관 장착형은 전자식 펌프 냉각 방법으로 자연대류 방식과 압축공기 냉각 방식을 채택하지만, 풀침지형은 소듐 자체 순환냉각방식이나 외부적인 강제냉각 시스

템 없이 고온 재료(도체, 코아, 절연재)로 만든 전자식 펌프를 원자로 풀 속에 넣어 최대 온도 600℃에서 사용할 수 있도록 한다.

ALMR과 MDP의 설계개념에서 채용하고 있는, 고온(600℃)에서의 내열성을 갖춘 대용량(43.5m³/min, 75m³/min)의 침지형 전자식 펌프는 아직 개발 중에 있으며 최근에는 GE와 일본의 Toshiba가 합작으로 시제품을 제작하여 testing을 완료하였다. 43.5m³/min 용량의 이 펌프는 환단면의 이중 고정자 구조를 가지고 있으며, 노내 실증시험을 위해 액체 소듐 속에 완전히 담그어 시험하였다. 1997년 5월 프랑스의 Nice에서 개최된 ICONE-5에서 발표된 Kwant 등의[49] 결과에 의하면 10,344시간의 시험을 완료하였으며, 펌프의 peak 효율은 33~37%, 최적 주파수는 슬립 0.32일 때 23Hz 이었다.

MDP 설계 개념에서는 2차 소듐 순환계통의 전자식 펌프를 증기발생기와 일체화한 개념을 적용하고 있다. 기계식 펌프에 비하여 전자식 펌프는 compact화 할 수 있으므로 이러한 설계 개념이 가능하다. 또한 1차 전자식 펌프를 IHX(Intermediate Heat Exchanger)와 일체화하는 개념도 고려될 수 있다.

원자로에 사용되는 대용량 기계식 펌프는 600℃ 고온에서의 휠의 건전성, 실링, 베어링, 회전축 등의 문제와 구동 모터의 성능 등 여러 가지 기술적인 면에서 경수로의 경우를 고려하면 당분간 국산화할 가능성이 희박하지만 전자식 펌프는 구동 부분이 없어 대학의 실험실에서도 만들 수 있을 정도로 원리가 간단하여 국산화가 쉽게 가능한 분야이다. 비록 전자식 펌프용 전자석 코일에 대한 기술개발이 많이 이루어져 사용하기에 충분한 재료가 개발되어 실험적으로 검증되었지만 아직 더 개발하여야 할 분야이다.

기계식 펌프는 한 종류의 형상 만으로 제작 가능하지만 구동 부품이 없는 전자식 펌프는 전자석 코일의 배치에 따라 여러 가지 모양으로 형상을 바꿀 수 있다. 즉 기계식 펌프와 같이 원통형인 형상으로 만들 수도 있지만 사각형으로 또는 Flow Couple, 환류형으로 만들 수도 있으므로 전자식 펌프 채용시에는 노형 선택의 폭이 넓어 진다.

3.5 정비성

기계식 펌프는 펌프 자체가 복잡하고 많은 부품들로 구성되어 있으며 윤활유, 커버가스 정화, 회전축 seal의 교환이 필요하다. 그러나 전자식 펌프의 경우에는 구동부분이 없어 근본적으로 maintenance가 필요치 않지만 만일 전자식 코일이 파손될 경우라도 유로 duct 외부에 설치되는 전자식 코일을 교체하면 되며, 배관장착형의 경우에는 정비시 배관계통을 개봉하지 않아도 되는 편이성이 있다. ALMR 개념에서 1차 냉각재 순환에 사용되는 전자식 펌프의 수명은 30년으로, 2차 기계식 원심 펌프의 seal 교환 주기가 약 20,000시간(약 2.3년)인 것에 비하면 큰 차이를 보인다. 전자식 펌프는 장치 자체의 고유한 단순성과 기계적 구동부품이 필요치 않아 펌프를 단순화시켜 순환계 규모를 획기적으로 단순화할 수 있으며, 임의의 장소에 설치하여 운전할 수 있는 자유도가 커서 원자로 용기 및 순환 배관 설비를 소형화할 수 있다.

3.6 경제성

ALMR의 경제성 평가에 의하면, 전자식 펌프의 가격이 기계식 펌프에 비하여 거의 비슷하지만 약간 적은 것으로 나타난다. 전자식과 기계식 펌프를 비교한 자료를 표 10에 나타내었다.[50] 표에 나타난 바와 같이 전자식 펌프에는 동기장치가 필요하므로 Capital Cost가 0.09mills/kW-hr 높게 된다. 또한 효율이 40-45%로 기계식 펌프의 70-80%에 비하여 현저히 낮으므로 출력 감소 손실이 0.07mills/kW-hr 만큼 발생한다. 그러나 Plant Availability 증가로 인하여 0.57mills/kW-hr의 이득이 발생하므로 전자식 펌프를 채택하는 것이 경제성을 높여준다.

전자식 펌프는 현재 개발 단계에 있으므로, 우리 기술로 직접 개발하여 성공을 거둔다면 그에 따른 부수적 효과도 클 것으로 기대된다. 현재 국내에서 배관 장착형의 전자식 펌프를 설계 제작한 바가 있으며, 장치 풀침지형 전자식 펌프의 대용량화가 성공하여 액체금속로 KALIMER에서 냉각재인 액체 소듐 순환용 펌프로 사용되어 지는 것을 목표로 개발하고 있다.

산업용 응용분야로는 기계화가 곤란하고 위험이 따르는 주조 공장이나 정

Æ 10. Busbar Cost Reduction for EM pump

	mills/kW-hr
Higher Capital Cost	+0.09
Reduced Plant Output	+0.07
Improved Plant Availability	-0.57
Net	-0.47

런소에서 용융된 금속의 이송과 주입이 필요 불가결한 중노동이므로, 전자식 펌프의 특징인 비접촉 구동성을 이용하여 이들 난점을 극복할 수 있다. 더불어 현재 실험 단계에 있는 핵융합로의 플라즈마 내에서 삼중수소 증식재와 냉각재 역할을 하는 액체 리튬(Li)의 순환계통에서도 액체금속로 용으로 개발된 전자식 펌프가 활용될 수 있을 것이다. 또한, 직접발전의 한 방법인 액체금속을 사용한 자기유체역학(MHD, Magnetohydrodynamics) 발전기의 순환계통 연구 및 개발에도 기여를 할 수 있다.

3.7 종합

기계식 펌프는 제작 경험이 풍부하고 성능이 실증되었으며 효율이 높고 상용화되어 있는 상태이지만, 구조가 복잡하고 무거우며, 공간 활용에 제약이 많다. 한편 전자식 펌프는 아직 고온 및 대용량에서 실증되지 못한 상태로 개발이 진행 중이다. 그럼에도 불구하고 소형화가 쉽고 설치상의 제약이 거의 없어 새로운 노형 개발에 적합하여 신개념의 액체금속로에서 채택하고 있는 설계개념이다. 여러 가지 면에서 기계식 펌프와 전자식 펌프의 장단점은 상호 배치되고 있다. 위의 검토 내용을 도표로 장단점을 요약하여 표현하면 표 11과 같다.

표 11. 기계식 펌프와 전자식 펌프의 비교 검토

항 목	기계식 펌프		전자식 펌프		비 고
	장 점	단 점	장 점	단 점	
기능성	<ul style="list-style-type: none"> · 제작 및 운전 경험이 풍부 	<ul style="list-style-type: none"> · 무겁고 자유액면 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 구동부분이 없어 고장율이 적음 · 가벼워 내진설계 용이 · 정비가 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> · 기계적 관성이 없어 보조장치 필요 · 효율 낮고 대용량화 할수록 효율 감소 · 대용량 침지식 펌프의 검증이 필요함 	<ul style="list-style-type: none"> · 전자식 펌프는 원자로 소형화 가능
운전성	<ul style="list-style-type: none"> · 오랜 운전경험이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 보조장치가 많이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 출력제어가 용이함 		
안전성	<ul style="list-style-type: none"> · 전원차단시 관성력이 있어 초기 비상 노심 냉각 용이 	<ul style="list-style-type: none"> · 자유액면 위의 커버가 스가 노심 내부로 흡입 가능 		<ul style="list-style-type: none"> · 긴 역U형 배관 형성으로 자연순환시 상부에 가스 누적 가능성 · 전원차단시 관성력 없음 	
제작성	<ul style="list-style-type: none"> · 개발이 완료되었고 제작회사가 많아 구입이 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> · 고온용 많은 구동 부품이 있어 제작에 고도의 기술 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 구동 부품이 없고, 원리가 간단하여 제작이 용이함 · 개발 여지가 많음 	<ul style="list-style-type: none"> · 고온/내방사선용 전자석 코일의 개발이 더 필요함 · 코일냉각 계통이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 대용량 전자식 펌프는 제작 경험이 없음 · 기계식 펌프는 국산화가 어렵지만 전자식 펌프는 국산화가 가능함
정비성		<ul style="list-style-type: none"> · 자체가 복잡하고 많은 보조계통으로 구성되어 정기적인 보수가 필요함 	<ul style="list-style-type: none"> · 근본적으로 정비가 필요치 않으나 전자석 코일 교환시에도 간편함 		
경제성			<ul style="list-style-type: none"> · Plant Availability 높음 · 국산화가 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> · 동기장치가 필요하므로 Capital Cost 높음 · 효율이 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> · 제작비는 비슷함 · 전자식 펌프 채용시 원자로의 직경을 감소시켜 전체적으로 경제성 높음

4. 결 론

실용적인 측면에서 보면 기계식 펌프는 기술 개발과 액체금속로에서의 실증검증이 완료되었고 오랜 운전 경험이 축적되었다. 배관식 전자식 펌프는 소듐 시설에 오랜 사용경험은 있으나, 대용량 침지형 전자식 펌프는 아직 개발 단계에 있으며 특히 전자식 펌프에 사용되는 전자석 코일은 고온, 내방사선 조건에서 소규모 실험적으로는 검증되었지만 앞으로 더 많은 연구 개발이 필요한 분야이다. 그러므로 이런 측면에서는 전자식 펌프보다 기계식 펌프를 채용하는 것이 액체금속로의 건전성과 신빙성을 높힐 수 있다.

그러나 액체금속로가 상업로로 개발되기 위하여서는 경수로 보다 경제성을 높이는 것이 필수 불가결하다. 전자식 펌프보다 형상이 단일하고 부피가 크고 무거운 기계식 펌프를 채용하여 기존 운전되고 있는 노형들과 유사한 노형으로는 이와 같은 목적을 달성할 수 없을 것으로 사료된다. 전자식 펌프는 자체가격으로는 기계식 펌프와 유사 하지만 규격이 작아 원자로를 Compact화 하는데 유용하게 활용할 수 있으므로 액체금속로의 경제성을 제고시키는 한 가지 방법이 될 수 있다.

기계식 펌프의 모양은 원통형 한가지 모양을 변화시킬 수 없는데 반하여 구동 부품이 없는 전자식 펌프는 전자석 코일의 배치 방법에 따라 여러 가지 모양으로 개발할 수 있으므로 전자식 펌프를 채용시에는 독자 노형을 개발하기가 용이하다.

전자식 펌프는 아직 실증검증되지 않았고, 전자석코일이 원자로 조건에서의 건전성이 문제가 되지만 세계적으로 전자석 코일에 대한 기술 개발은 빠른 속도로 이루어지고 있어 조만간 실용화될 가능성이 높다. 구동 부품이 없는 전자식 펌프는 개발이 쉬우며, 원리가 삼상 유도 전동기와 유사하기 때문에 국내 삼상 유도 전동기 제작 기술로 국산화가 조기에 가능할 것으로 판단되며 차후 핵융합로의 냉각재인 리튬의 구동용으로도 활용될 수 있다.

경제적인 액체금속로 개발이라는 관점에서 보면 개발 위험부담은 있으나 전자식 펌프를 채용하여 개발하는 것이 바람직 하다.

참 고 문 헌

1. 조만, “혁신개념 고속증식로”, 기술개발 8집, 40(1991)
2. 魚谷正樹외 7인, FBR 신기술 연구 “혁신형 원자로 구조의 탐구”, 일본 전력중앙연구소 종합보고 T18, 1990.
3. 吉田和生 외 3인, Common Use of Equipments among Small Modular LMFBRs, 일본 전력중앙연구소 종합보고 T92042, 1993.
4. A. E. Walter and A. B. Reynolds, Fast Breeder Reactor (Pergamon Press, New York, 1981).
5. 조만의 33인, 액체금속로 개발, 액체금속로 개발방향 설정연구, 과학기술처 연구보고서 KAERI/RR-1397/93, 한국원자력연구소, 1994.
6. 리니어 모터 응용 핸드북 (도서출판 세화, 서울, 1988).
7. R. S. Baker, “Electromagnetic pump for liquid metals”, Mech. Eng. p.15, July (1964).
8. M. Namba, “Electromagnetic pumps for LMFBR”, Toshiba Review, 116, 17 (1978).
9. C. Yang and S. Kraus, “A Large electro-magnetic pump for high temperature LMFBR applications”, Nucl. Eng. Design 44, 383(1983).
10. O. J. Foust, Sodium-NaK Engineering Handbook, Vol.IV (Science Publishers, New York, 1987).
11. “Electromagnetic pumps for liquid metals”, Novatome, 1977.
12. Conduction pumps catalogue, CA21-CA22-CA81, Novatome, 1977.
13. Flat induction pumps catalogue, IP121-IP201-IP202A-IP501-IP653, Novatome, 1977.

14. Annular induction pumps catalogue, IA124-IA251-IA501-IA1401, Novatome, 1977.
15. D. F. Davidson, US Patent, 4,177,015, 1978.
16. E. Duncombe, US Patent, 4,527,955, 1982.
17. 長谷部信也, 麗野快男, “圓筒形 單相 誘導電磁ポンプの渦電流, 體積力解析”, 電氣學會論文誌. 102-B, 57 (1982).
18. 後藤忠, 山形保男, 鈴置昭, 加澤義彰, “ナトリウムサイドバー型 リニアインダクション 電磁 ポンプの特性”, 日本原子力學會誌, 25, 196 (1983).
19. ゴードン.サッチャー-, 公開特許公報(A), 昭58-127,556, 1983.
20. 橋本靖郎, 公開特許公報(A), 昭59-2,563, 1984.
21. 近藤勝彦, 公開特許公報(A), 昭59-47,713, 1984.
22. 酒井隆雄, 公開特許公報(A), 昭59-76,166, 1984.
23. 鴨原重之, 公開特許公報(A), 昭60-70,959, 1984.
24. 田所昌宏, 公開特許公報(A), 昭60-204,254, 1985.
25. 外岡一公, 公開特許公報(A), 昭62-185,863, 1987.
26. 山下隆士, 公開特許公報(A), 昭63-76,750, 1988.
27. 佐藤吉彦, 公開特許公報(A), 平1-157,259, 1989.
28. 山下隆士, 公開特許公報(A), 平1-271,055, 1989.
29. M. Assadollahbaik and H. Liu, “Optimum design of electromagnetic pump for capsule pipe lines”, J. of pipilines, 5, 157 (1986).
30. M. Assadollahbaik, H. Liu, and F. G. Hoft, “Experiments on an electromagnetic capsule pump”, Trans. of the ASME,108, 262 (1986).
31. H. C. Behrens, US Patent 4,828,459, 1987.

32. 홍상희, 조수원, 김희령, 이상돈, 서준호, 액체금속로 냉각재 순환용 전자식 펌프 연구개발 (2), 한국원자력연구보고서, 기초전력공학공동연구소, 1994.
33. 홍상희, 조수원, 김희령, 이상돈, 서준호, 액체금속로 기술개발, 침지식 전자식 펌프 개발(1), 한국원자력연구보고서 KAERI/CM-069/94, 기초전력공학공동연구소, 1995.
34. J. R. Grana and R. C. Kumpitch, Pumps for Liquid Metal Fluid Controls, ASME-66-FE-20, paper presented at 1966 ASME-EIC Fluids Engineering Conference, Denver, Colo., Apr. 25-28, 1966
35. D. E. Westerheide, J. C. Clifford and G. Burnet, A Diaphragm pump for Liquid-Metal Service, USAEC Report IS-464, Ames Laboratory, Iowa, October 1962.
36. S. A. Nasar and I. Boldea, Linear Motion Electric Machines, John Wiley & Sons, 1976
37. 서울대학교 공과대학 생산기술연구소, "전기기계", 대한 교과서 주식회사, 1986, pp.56-141
38. C. W. Chen, Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials, Dover Publications, New York (1986)
39. D. I. Gordon, et al., "Radiation Effect in Magnetic Materials", Nucleonics Vol.16, No.6 (Jun. 1958)
40. R. S. Sery and D. I. Gordon, "Nuclear Irradiation Effects on Soft Magnetic Materials", Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II, Session 3 (1958)
41. A. I. Schindler, et al., "Effects of Nuclear Environment on Magnetic Materials. (B) 60-cy and dc Characteristics of Alloys", Ibid.
42. F. A. Garner, et al., "Response of Solute and Precipitation Strengthened Copper Alloys at High Neutron Exposure", J. of Nuclear Materials, 191-194 (1992)

43. D. J. Edwards, et al., "Irradiation Performance of Oxide Dispersion Strengthened Copper Alloys to 150 dpa at 415°C", Fusion Reactor Materials Semiannual Report, DOE/ER-0313/11 (1992)
44. G. J. Butterworth and C. B. A. Forty, "A Survey of the Properties of Copper Alloys for Use as Fusion Reactor Materials", J. of Nuclear Materials, 189 (1992)
45. 押山 孜 外, "超高温モータ絶縁とモータの適用例", 安川電機 第46巻, 通巻 第176号 No.3 (1982)
46. 熊澤 良二 外, "高温電磁ポンプ用コイル絶縁のヒートサイクル特性", 平成元年 日本 電気学会全国大会 (1989)
47. T. K. Gupta and W. S. Neff, "New Composite Inorganic Insulator" NAECON '75 Record (1975)
48. H. Mitsui, et al., "New Ceramic Insulation System for High Temperature Equipment", 5th BEAMA International Electrical Insulation Conference (1986)
49. W. Kwant, et al., "In-Sodium Testing and Performance of a 43.5m³/min Electromagnetic Pump for LMR Application", Proceedings of ICONE 5, ICONE 5-2553 (1997)
50. Leslie R. Dahl, Private Communication.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/AR-476/97			
제목/부제	칼리머 냉각재 순환펌프 형식 타당성 분석		
연구책임자 및 부서명	남호윤(액체금속로냉각재기술개발)		
연구자 및 부서명	김용균, 이용범, 황종선, 최석기		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	74 p.	도표	있음(○), 없음()
크기	25.7 Cm.		
참고사항			
비밀여부	공개(○), 대외비(), _급비밀	보고서 종류	기술현황분석보고서
연구위탁기관		계약 번호	
초록(15-20줄내외)	<p>액체금속로의 노형 선택, 원자로의 경제성, 신뢰성 등에 많은 영향을 주는 냉각재 순환 펌프 설계 개념으로서 기계식 펌프와 전자식 펌프의 특성을 비교 검토하였다. 활용 경험이 풍부한 기계식 펌프는 개발 노형의 신뢰성을 만족시킬 수 있으나 부피와 무게가 크고 개발 가능성이 낮아 KALIMER의 개발 목표인 경제성 있는 액체금속로를 달성하기는 어려울 것이다. 대용량의 전자식 펌프는 아직 검증되지 않은 실정이나 조만간 실증될 것으로 예상되며, 전자식 펌프를 채용하면 개발에 대한 부담은 있지만 기계식 펌프에 비해 규격이 작아 원자로를 조밀화시킬 수 있으므로 액체금속로의 경제성을 제고시키는 한 방법이 된다. 또한 전자식 펌프는 전자식 코일의 배치에 따라 여러 모양으로 바꿀 수 있으므로 액체금속로 개발 과정에서 신 노형 개발이나 독자 노형을 개발하기가 용이하다. 그러므로 경제적인 액체금속로 개발이라는 측면에서 보면 전자식 펌프를 채용하는 것이 바람직하다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	액체금속로, 냉각재 순환 펌프, 기계식 펌프, 전자식 펌프		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/AR-476/97					
Title/Subtitle	Feasibility Study on the Type of KALIMER Coolant Circulation Pump				
Project Manager and Department			H.Y. Nam		
Researcher and Department					
Y.K. Kim, Y.B. Lee, J.S. Hwang, S.K. Choi					
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1997.
Page	74 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input type="radio"/>), No(<input type="checkbox"/>)	Size	25.7 Cm.
Notes					
Classification	Open(<input type="radio"/>) , Restricted(<input type="checkbox"/>), _Class Document		Report Type	State-of-the-Art Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 lines)					
<p>The characteristics of mechanical pump and electromagnetic(EM) pump for liquid sodium coolant in a liquid metal reactor are compared and analysed as a design concept of KALIMER coolant pumps. The type of coolant circulation pump affects the selection of reactor type, economics, and reliability of reactor. Though the mechanical pump has much application experience and give satisfaction to the reliability of developed reactor type, the possibility of development is limited and its large weight and volume have a negative effect on the design of the economical liquid metal reactor. The large scale electromagnetic pump has not been verified yet, but it is expected to be demonstrated in time. Because the size of EM pump is small relative to the mechanical pump, the compact reactor design is possible. Therefore the selection of EM pump can be one of the methods to improve the economics. Since the shape of EM pump can be varied according to the arrangement of electromagnet coils, a new or unique reactor type can be developed easily in the process of KALIMER development. In the view point of economic LMR development, it is desirable to adopt the electromagnetic pump.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)	Liquid Metal Reactor, Coolant Circulation Pump, Mechanical Pump, Electromagnetic Pump.				