

‘95 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

포항방사광가속기 저장링시운전시의 방사선측정

이희석, 김제한, 홍석모, 박응수, 정진화
포항가속기연구소

요 약

포항방사광가속기(Pohang Light Source)의 시운전기간동안 저장링건물에서의 방사선발생량을 측정하였다. Ionization Chamber와 Moderated BF₃ Counter로 구성된 지역방사선감시기시스템(RMS)외에 Pocket Ionization chamber, 연속기록이 가능한 Surveymeter를 고정 또는 이동시키면서 사용하였다. 시운전기간동안 선형가속기로부터의 입사시기와 저장시기에서의 방사선방출분포 및 선량의 정도가 명확히 구별되었으며 RF Cavity나 Bump Magnet 등의 오동작에 의한 방사선 발생경로를 추정해 볼 수 있었다. 여기서는 저장링실험지역등에서의 공간선량분포와 부분차폐에 따른 변화를 측정하였으며 측정결과로부터 차폐계산시 사용된 방법을 통해 역으로 각지역의 빔손실정도를 추정하고 계산식의 타당성을 검토해 보았다.

A. 서 론

고에너지가속기로부터의 방사선생성은 국내에서 거의 검토되지 않은 대상이었으나 포항방사광가속기가 본격가동됨에 따라 고에너지 방사선을 접할 수 있게 되었다. 포항가속기연구소는 1994년 10월말 부터 12월까지 저장링의 1차시운전을 실시하였고, 이 기간동안 Ionization Chamber와 Moderated BF₃ Counter로 구성된 RMS 시스템외에 Victoreen사의 Pocket Dosimeter(541R)와 Eberline사의 GM Counter(HP-290, HP270)와 Rem Counter(NRD)를 고정설치하여 공간선량분포를 측정하였다. 또한 고선량지역에서는 펄스형가속기의 특성상 Dead Time을 무시할 수 있는 Ionization Chamber Type의 Surveymeter를(Victoreen사, 450P) 이용하여 국부적인 위치의 선량을 측정하였다.

고에너지전자가속기에서의 방사선생성은 주로 Bremsstrahlung과 쌍생성반응에 의한 Electromagnetic Shower와

광핵반응에 의해 Photon과 Neutron을 생성하게 되며 이들의 에너지는 포항방사광가속기의 경우 수백 MeV에 이른다. 그러나 차폐벽을 투과하면서 상당한 부분의 에너지가 수십 MeV 이하가 될 것으로 예상되고 있다.

저장링건물내의 실험지역과 기타지역등의 공간선량분포는 출입자를 관리하고, 부분적으로 차폐벽을 보완하기 위한 중요한 자료가 된다. 차폐벽의 두께를 결정할때 사용한 W. Swanson의 반실험식을 이용해 측정된결과로부터 각위치의 빔손실량을 추정해봄으로써 반실험식의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

B. PLS 구조 및 운전형태

포항방사광가속기(PLS)는 150m의 전자선형가속기와 주궤도길이 280m의 저장링으로 구성되어 있다. 시운전기간 동안 2GeV 에너지의 전자를 가속시켜 최대 292mA의 전류를 저장할 수 있었다. (그림 1)

저장링운전형태

선형가속기의 전자총에서 2A, 2nsec. 10Hz 로 출발한 빔 중 400 - 600mA 의 전자빔이 저장링으로 입사되었으며 초기입사효율은 1%이하이었으나 10~20%정도로 향상되었고 더이상 증가하지 못하는 이유중에 하나가 진공상태의 양 좋음이 있다. 방사선의 발생형태를 구분짓기 위하여 시운 전기간중 운전형태를 다음 네가지로 나누어 보았다.

- Case 1 : 3,4 번 Bump Magnet 사이에 있는 Screen Monitor (D01SC)에 전자빔이 입사될 때
- Case 2 : Bump Magnet 을 동작하여 저장링에 저장을 할때
- Case 3 : 이미 상당량이 저장되어 있는 상태에서 Bump Magnet 을 정지시키지 저장링에 입사시킬 때
- Case 4 : 선형가속기로부터의 입사를 중지하고 순수하게 저장링에 전자가 저장되어 있을 때

C. 측정방법

저장링건물내의 공간선량분포는 실시간대 측정이 가능한 시스템을 이용, 위에서 언급한 운전형태에 따라 공간선량분포의 변화를 측정하였고, Pocket Dosimeter 를 고정적으로 설치 일별로 직접선량을 측정하였다. 지역방사선감시기는 광자용과 중성자용을 1조로 구성하여 설치하였고 매 5 분간격으로 평균선량율을 기록한다. 기타 계측기는 1분에서 5분까지 필요에 따라 변경시키면서 측정하였다.

측정기기

- 중국 IHEP 에서 제작한 Ionization Chamber, Moderated BF₃ Counter(Energy Range up to 20MeV) : Personal Computer 와 연결되어 Parameter Setting 및 Data Logging, Alarm, Display 기능이 있음.
- Eberline 사 ESP2(500 개의 Data Logging)에 연결된 HP-290(High Dose 용 GM Counter),270(GM Counter), NRD (Polyethylene Moderated BF₃ Rem Counter)
- Victoreen 사 Pocket Dosimeter(541R)

측정위치선정

그림 2 에서 보여주는 바와 같이 고정된 지역방사선감시는 연구소원의 출입빈도와 최대 선량으로 예상되는 위치에 설치되어 있고, 그외 RF Cavity, Bump Magnet 등 빔

손실에 의해 누설방사선이 많은 L2, L10 등 입사지역주변의 터널외벽을 따라 Ratchet Wall 쪽과 Control Shed, 터널천정등에 실시간대 측정이 가능한 계측기를 설치하였다. Pocket Dosimeter 는 앞에서와 같은 목적으로 입사지역주변에 설치되었고, 실험지역 전방향에 대한 분포측정을 위해 실험지역 외벽근처의 I-Beam 29 개소에 설치하였다.

직접선량을 평가하기 위한 빔운전시간은 선형가속기에서 저장링으로의 입사를 개시하여 끝나는 시점까지로 하였고, 측정시점은 매일 오전 10 시를 전후로하여 전달운전과 당일운전으로 구분하였다. 1차시운전에서는 24 시간 가동은 마지막 1 일정도였고 나머지경우는 당일로 운전을 종료하였다.

평균 선량을 분포를 구한 방법

특정 운전형태가 상당시간(15 내지 30 분이상)동안 지속될때에는 해당시간범위에서 평균선량율을 계산하였고, 짧은 시간간격을 두고 운전형태가 반복될 때에는 반복되어지는 전시간에 걸쳐 각운전형태의 평균치를 취하였다. 이렇게 구해진 자료는 입사빔전류가 같은 운전날짜의 자료들을 모아 다시 평균선량율을 구하였다.

D. 측정결과

고에너지가속기의 방사선은 넓은 에너지대의 광자와 중성자로 이루어진 혼합장으로서 각각에 대해 모두 측정이 이루어졌으나 여기서는 광자에 대한 선량만 언급하기로 한다.

직접선량으로 본 공간선량분포

11 월과 12 월의 시운전은 빔입사효율에 있어서 큰차이가 있다. 즉 시운전이 끝나갈 무렵, 빔입사효율이 상당히 개선되어 Case 3 인 시기가 전월에 비해 증가하여 그림 3 의 (a)에서 보듯이 입사지역의 하류위치에 해당하는 50° - 130°(입사위치를 기준으로) 근처에서의 빔손실에 의해서 EX15 - EX23 위치의 방사선량이 높게 나타났다. Case1 의 시기에도 비슷한 위치에서 선량이 증가하는데 단지 입사지역쪽으로 당겨질 뿐이다. EX3-1 - EX7 위치에서의 선량은 Case2의 경우에 해당하며 이는 입사된빔이 1 회전후 RF Cavity 에 이르러 수용되지 못하고 손실되기 때문이며 (그림 의 (d)의 고선량이 이것때문임) 또한 4 개의 Bump

Magnet 중 1 개라도 오동작하는 경우 Bump Magnet 주변에 빔손실이 생겨서이다. 이것은 (b)의 C01, (c)의 L10의 선량으로부터도 확인된다.

고에너지 가속기에서 생성된 광자는 중성자와 달리 각도분포가 진행방향에서 가장 많은 선량을 갖는데 L2 위치는 RF Cavity 위치에서 간섭된 빔이 하류의 Photon Stop 등에서 손실될때 진행방향이고, L10은 Bump Magnet 지역의 하류인 1A Synchrotron Radition Port가 빔손실 위치가 될때의 진행방향이다.

실험지역의 관리기준은 1mrem/hr 로서 (a)에서 전체 평균이 1 mR/hr 이하이나 터널벽면에서는 그상의 값이 나타났다.

운전형태에 따른 공간선량분포

Case1 : 3번과 4번사이에 있는 Screen Monitor는 대부분 SUS로 구성되어 있으며 중심에 직경 1cm 범위는 두께 1mm 정도의 Screen이 45° 각도로 놓여있고 나머지부분은 Support가 설치되어 빔이 입사되는 범위는 직경 3cm 정도이다. 시운전중 대부분의 경우 입사빔의 90%정도가 중심의 직경 1cm내로 입사되었다. 여기서 두가지 경우 즉 두께 1mm 정도의 중심부위에 전자빔이 입사할 때, 그리고 평균두께 18mm인 Support 부분에 빔이 입사할 경우에 대해서 Electromagnetic Shower Monte Carlo Code인 EGS4를 이용해 평가해본 결과 1mm 두께의 경우 약 60%정도의 전자만이 원래에너지와 근사한 에너지를 갖고 투과하며 나머지는 낮은에너지를 갖으므로 2극전자석등을 지나면서 궤도가 심하게 외곡되어 손실된다. 또 18mm의 경우는 고에너지전자는 거의 나타나지 않고 광자와 양전자(1.4 GeV 정도에서 0.01%정도생성 낮은 에너지로 갈수록 커짐)가 상당량발생된다. 이것은 입사지역 하류의 선량증가를 적절히 설명해준다.

Case 2 : Case1에 비해 L2의 선량율이 증가하고 L10의 선량율이 감소하는 것을 주목할 필요가 있다. 이는 앞에서 언급한대로 상대적으로 D01SC에서의 빔손실이 감소하고 RF Cavity에서의 의한 빔손실이 증가하기 때문이다. 표 3의 추정된 빔손실율에서도 이를 발견할 수 있다.

Case 3 : Case3가 비록, 미리 저장된 전자빔을 갖고 있다고 하여도 이것의 손실은 Case4에서 보는 바와 같이

미약하고 오히려 저장링 전자궤도에서 33mm 벗어나 입사되는 전자빔이 비정상궤도를 비행하므로 Case1과 유사한 빔손실분포와 선량율분포를 갖게 된다.

Case 4 : 순수하게 저장된 전자빔만을 갖는 경우는 Lifetime에 따라 저장링전체에 균일하게 빔이 소량씩 손실되므로 선량율이 매우 작다.

그림 4에서는 각 운전형태에 따른 선량율변화를 저장링류와 비교하여 나타내었는데 ㉠시간대는 Case1에 해당하며, ㉡시간대는 Case2와 Case3가 반복되고 있고, ㉢시간대는 선형가속기가 정지하여 순수히 저장된 빔만 존재하는 Case4에 해당한다.

차폐보강실험 및 차폐계산용 반실험식의 검증

추가로 보완해야할 차폐정도를 평가하고 동시에 차폐계산시에 사용하였던 반실험식의 신뢰도를 검토하기위해 측정된 결과로부터 역으로 빔손실율과 위치를 추정한 결과가 표 3에서 보여진다. 빔손실분포는 예상했던 바와 유사하여 반실험식의 신뢰성을 일부 확인할 수 있었다. 동시에 실제 터널내 특정위치(1A Port 앞)에 납 5cm 두께의 차폐를 추가하여 L10 위치에서의 누설방사선의 감쇄를 표 2와 같이 확인 할 수 있었다.

E. 결론

측정된 결과들로부터 차폐계산시 예상했던 형태의 방사선방출을 확인할 수 있었고, 추가로 차폐를 보강해야할 위치와 크기를 판단할 수 있게 되었다. 저장중에는 실험지역의 방사선준위가 낮아 Synchrotron Radiation User들이 안전하게 실험을 할 수 있을 것이라 판단되지만 입사시기를 위해서는 차폐보강등의 별도조치가 필요할 것이다.

Reference

1. 이희석, 정진화, Pohang Light Source의 방사선차폐, EN/TS(RS)92-003, Pohang Accelerator Laboratory, (1992)
2. 이희석, 김제한, PLS의 방사선차폐해석, Pohang Accelerator Laboratory, (1993), Not published.
3. W.P.Swanson, IAEA Tech.Rep. No188, IAEA, (1979).
4. W.R.Nelson, H.Hirayama, D.Rogers, The EGS4 Code System, SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, 1985

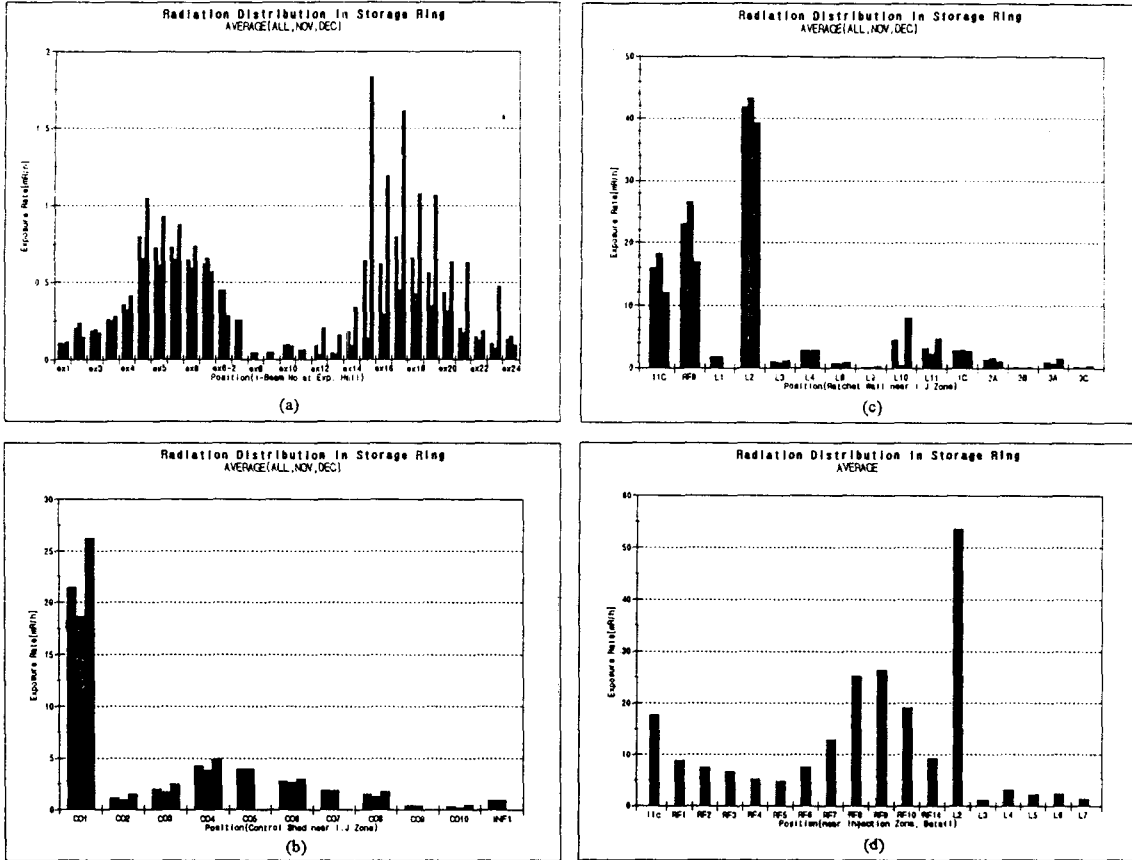


그림 3 Pocket Dosimeter의 직접선량으로부터 얻은 저장링 건물내 공간선량률표. (a)실명지역의벽후 I-beam, (b)Control Shed, (c)입사지역의 터널외벽, (d)RF Cavity위치의 타원외벽

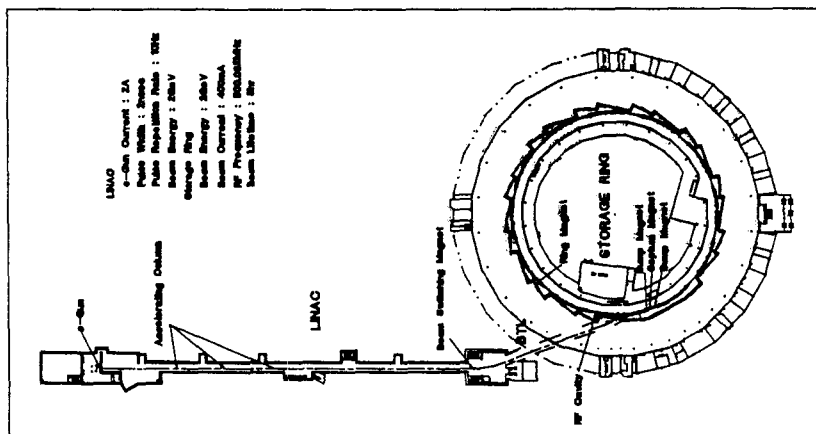


그림 1. 포항방사광가속기의 개략적구조

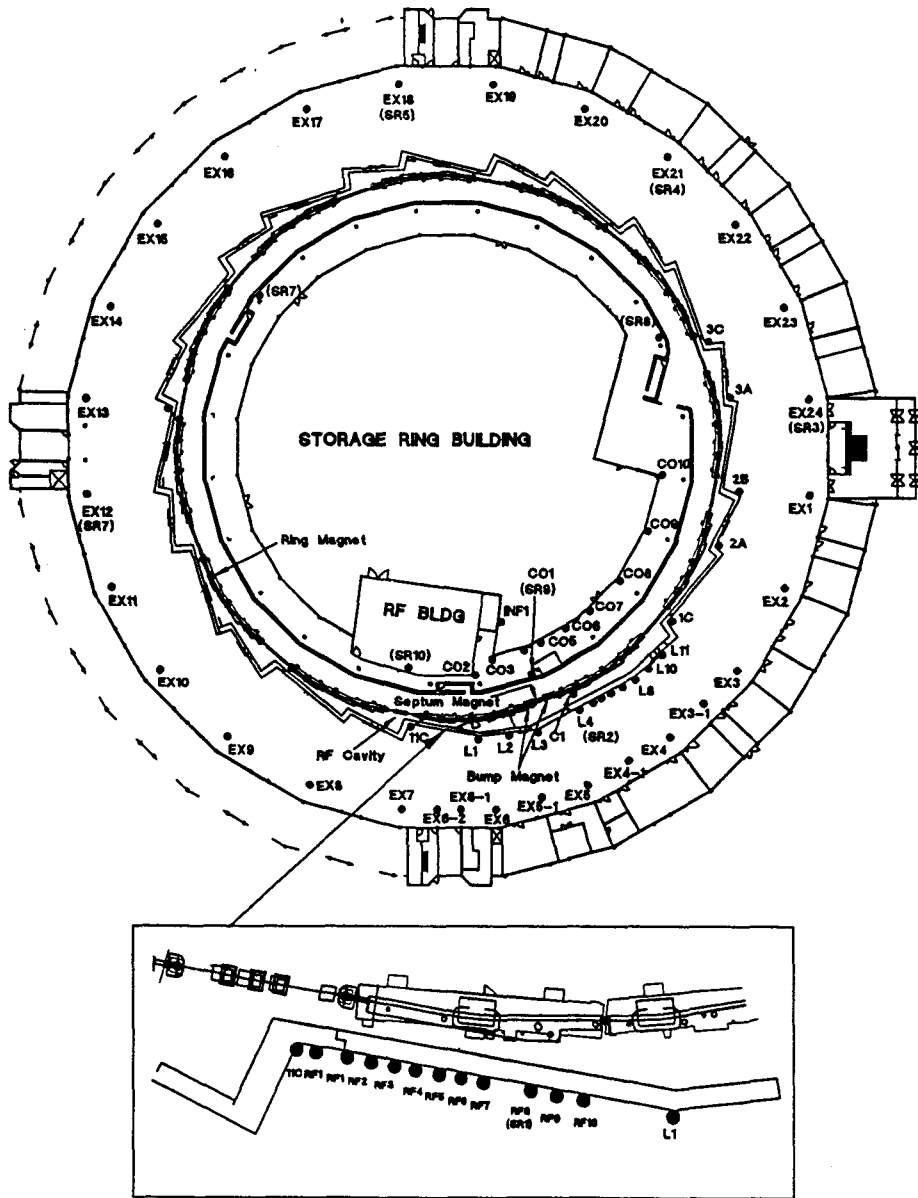


그림 2. 본 측정에 사용된 계측기의 설치위치 (SR1-10은 지역방사선감시기)

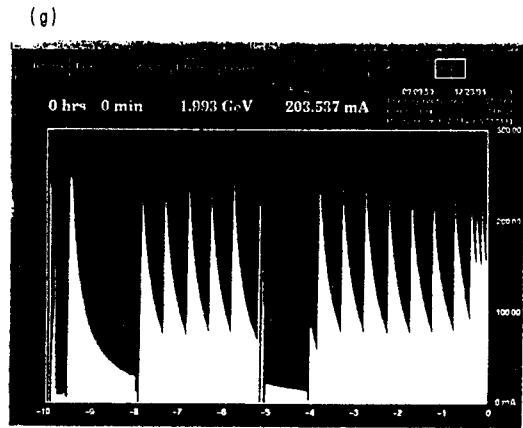
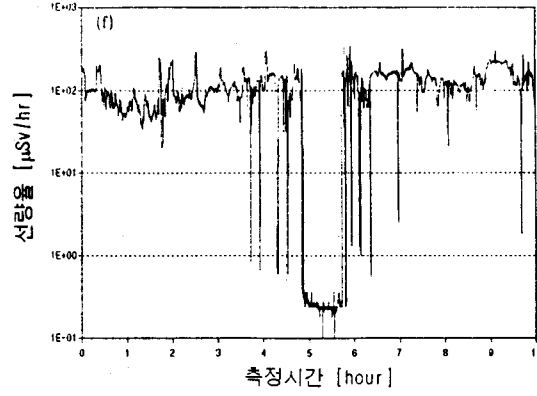
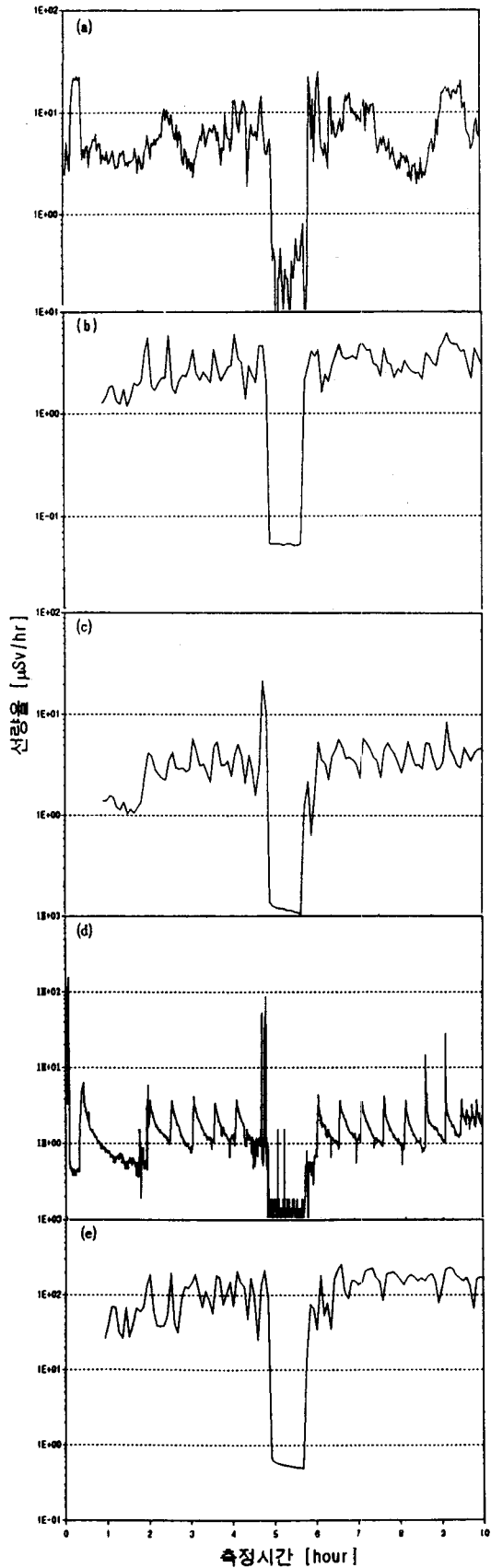


그림 4. 저장링 시운전중 저장전류와 RF Cavity 및 Bump Magnet 주변 차폐벽 외부에서의 측정 방사선량률의 변화. (입사빔전류: 529mA, 입사효율: ~11.4%, 입사시간: ~5min, 최대저장전류: 292mA, 빔에너지: 2GeV, 측정위치: (a)L10[부분차폐 납 5cm] (b)SR2 (c)SR1[부분차폐 납 5cm] (d)11C[부분차폐 납 5cm] (e)SR9 (f) C1[부분차폐 납 6mm] (g)방사선량 측정중 저장전류의 변화.

표 1. 운전형태에 따른 저장링 건물내에서의 평균방사선량을 분포 (입사빔전류: 400 ~ 630mA, 저장빔전류: 최대 292mA, 빔에너지: 2GeV).

측정위치	방사선량률 ($\mu\text{Sv/hr}$)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
11C	5 ~ 20	50 ~ 300	8 ~ 25	1 ~ 5
SR1	5 ~ 50	220 ~ 500	10 ~ 30	< 1
SR2	4 ~ 17	5 ~ 40	5 ~ 12	< 1
L2	20 ~ 160	1000 ~ 1800	40 ~ 100	< 1
L10	140 ~ 290	100 ~ 150	120 ~ 220	< 1
SR9	100 ~ 300	200 ~ 500	100 ~ 150	< 1
SR8	2 ~ 8	2 ~ 15	1 ~ 8	< 1
SR7	1 ~ 2	2 ~ 10	1 ~ 3	< 1
EX6-2	1 ~ 5	2 ~ 9	1 ~ 4	< 1
EX5-1	2 ~ 8	5 ~ 8	3 ~ 9	< 1
EX4	3 ~ 10	4 ~ 6	3 ~ 10	< 1
SR3	2 ~ 5	4 ~ 12	1 ~ 3	< 1
SR4	1 ~ 3	1 ~ 3	1 ~ 2	< 1
SR5	4 ~ 7	2 ~ 14	1 ~ 2	< 1
SR6	1 ~ 2	1 ~ 3	1 ~ 3	< 1
SR10	1 ~ 3	5 ~ 25	1 ~ 4	< 1

표 2 부분적인 차폐보강에 의한 누설방사선량의 감소효과.

차폐체 설치위치	측정위치	운전형태	차폐전		차폐후	
			입사빔전류 (mA)	측정선량($\mu\text{Sv/hr}$)	입사빔전류 (mA)	측정선량($\mu\text{Sv/hr}$)
1A	L10	Case 1	504-628	140 ~ 290	453 ~ 630	35 ~ 40
		Case 2		100 ~ 150		10 ~ 15

표 3. 운전형태에 따른 방사선량률과 W.P. Swanson의 반실험식을 이용한 빔손실량 계산 및 보강차폐체 두께계산.

측정 위치	Case 1				Case 2				Case 3			
	선량률 ($\mu\text{Sv/hr}$) (1)	빔손실 위치	빔손실 (%)	보강차폐 (Lead) 두께(cm)	선량률 ($\mu\text{Sv/hr}$) (2)	빔손실 위치	빔손실 (%)	보강차폐 (Lead) 두께(cm)	선량률 ($\mu\text{Sv/hr}$) (3)	빔손실 위치	빔손실 (%)	보강차폐 (Lead) 두께(cm)
C1	595	1A/PS	10	9.01	183	1A/PS	2.8	6.4	350	1A/PS	6	7.84
11C	36.5	Cav #4	3	2.85	59.4	Cav #4	0.8	3.93	56	Cav #4	0.5	3.8
SR1	36	12A/PS	3	7.9	372	12A/PS	5	7.97	23	12A/PS	0.5	1.84
SR2	7	12A/PS	3		8.3	12A/PS	5		4	12A/PS	0.5	
L10	302	1A/PS	10	7.51	9	1A/PS	2.8		25.6*	1A/PS	6	0.89
SR9	289	Septum	4	7.42	333	Septum	3	7.73	340	Septum	0.4	7.77
SR8	12.2	4A/PS	0.8	0.44	1	4A/PS			1.5	4A/PS		
SR7	4.2	8A/PS	0.1		7.1	8A/PS	0.1		1	8A/PS	0.1	
EX6-2	7	RFG	3		6	RFG	0.8		3.4	RFG	0.5	
EX5-1	3	12A/PS	3		7.2	12A/PS	5		6	12A/PS	0.2	
EX4	4.4	Septum	4		1.5	Septum	3		5	Septum	0.4	
SR3	42	2C/PS	5	3.16	2.1	2C/PS	5		3	2C/PS	0.1	
SR4	1.6	5C/PS	1		1.7	5C/PS			1.2	5C/PS	0.1	
SR5	12	7A/PS	0.1	0.4	1.8	7A/PS	0.1		1	7A/PS	0.1	
SR6	1	8C/PS	0.1		1.6	8C/PS	0.1		1	8C/PS	0.1	
SR10	< 1	Septum	4		7	Septum	3		1	Septum	0.4	

- 입사빔전류; (1) 554 mA (2) 630mA (3) 529mA

- Cav #4 : 4번 RF Cavity

- 1A/PS : 1번 Cell 첫번째 Synchrotron Radiation Beam Line(1A) 근처의 Photon Stop

- RFG : RF Cavity 하류의 Gate Valve.

- 빔손실 : 입사빔 전류에 대한 빔손실위치에서의 빔손실량의 비.

- * : 납블럭 5cm가 부분적으로 설치되어진 후의 측정치.