

포항 방사광 가속기의 저장링 격자설계

남 광 회 · 최 진 혁 · 한 상 준

(포항공대 방사광 가속기연구소 연구원)

1. 서 론

선형가속기(Linac)에서 가속된 전자 빔(electron beam)을 빛의 속도($\beta \approx 1$)로 오랜시간(10시간 정도) 돌 수 있도록 만든 장치를 저장링(storage ring)이라 한다. PLS 저장링은 2극, 4극, 6극 자석으로 구성된 전자석 cell이 12개 반복되어 있다. 2극 자석은 전자 빔의 경로를 휘게하기 때문에 휨자석(Bending magnet)이라 부르며, 따라서 가속기를 원형으로 만들 수가 있다. 전자 빔이 2극 자석에서 휘 때 가속되므로 빛을 방출하게 되며 싱크로트론 저장링의 궁극적인 목적은 이 빛을 발생시키는 것이다. 전자가 빛을 방출시킴으로써 잃는 에너지는 RF cavity의 synchronized wave를 이용해서 보충한다. 또 전자 빔의 focussing을 위해서 4극 자석(quadropole)을 여러 개 쓰며 또한 각 전자의 운동량 차이에 따른 불안정성(instability)을 보완하기 위해서 6극 자석을 쓴다.

2. 본 론

제3세대 방사광 가속기는 낮은 emittance와 삽입 장치를 위한 긴 직선 부분으로 특징지어진다. 이러한 요구를 충족시키는 형태로써 Triple Bend Achromat(TBA)와 Chasman-Green(C-G) 격자가 알맞다고 알려져 있다. 두 격자의 주요한 차이점은 cell의 중간에 휨자석이 있는나 하는 것인데 TBA의

경우에는 휨자석이 cell당 1개 더 있기 때문에 emittance를 더 줄일 수 있으며 보다 많은 beam line을 꺼낼 수 있는 장점이 있다. 반면에 수평 betatron 함수(β_x)와 dispersion 함수(η)를 가운데 휨자석에서 극소화해야 하기 때문에 tunability가 Chasman Green에 비하여 떨어진다. 에너지가 1-GeV 사이의 synchrotron은 주로 TBA lattice를 사용하는 경향이 있으며(예 ; LBL(미국), SRRC(대만), Super Arco(프랑스), BESSY II(독일), PLS(한국))6-8GeV 사이의 synchrotron은 Chasman-Green을 사용하는 경향이 있다. (예 ; ANL(미국), RIKEN(일본), ESRF(유럽))

PLS 저장링의 에너지는 2-2.5 GeV, 둘레는 276 m이며 12개의 cell로 구성되어 있다. PLS도 TBA를 격자 구조로 택했으나 특기할 것은 휨자석으로 복합기능 2극 자석(combined function dipole)을 사용하지 않았다는 것이다. 여기서 복합기능 2극 자석이란 2극 자석에 4극 자석 기능이 부여되어 있는 것을 말한다. 복합기능 2극 자석을 쓰면 vertical focussing 4극 자석을 덜 사용하게 되며 또한 수평 damping partition number, J를 1보다 크게 함으로써 emittance를 줄이는 효과가 있다. 그러나, 복합기능 2극 자석은 그 제작이 편평한 2극 자석보다 힘들 뿐만 아니라 기울어지는 오차(tilt error)가 발생하면 빔의 수평 수직 역학에 coupling이 생겨 좋지 않게 된다. 따라서 PLS는 보통 편평한 2극 자석을 사용하려 하며 최근 BESSY II도 편평한 2극 자석을

사용하여 격자를 설계하고 있다¹⁾ 또한 빛을 방출하는 장치로써 휨자석 뿐 아니라 wiggler, undulator와 같은 삽입 장치(insertion device)를 사용하며 제 3세대 synchrotron 가속기는 삽입 장치를 주 광원으로 사용한다.

낮은 emittance의 가속기는 모든 오차에 대해 매우 민감하여 우리나라의 제조 기술이 그 오차의 허용치를 벗어나지 않을 만큼 축적되어 있다고 단언하기는 무척 어려운 일이다. 그래서 우리는 가속기의 가동을 두 단계로 나누어서 하고자 한다. 즉 처음에는 약 $80\text{nm} \cdot \text{rad}$ 으로 emittance를 크게 가동하고 추후에 이것을 $10\text{nm} \cdot \text{rad}$ 으로 줄여 가동할 계획이다.

앞서 우리는 PLS 저장링의 에너지가 2에서 2.5 GeV에서의 안정된 작동에 좀더 많은 역점을 두었다. 그 결과 휨자석의 길이가 이전의 설계²⁾³⁾보다 길어졌다. PLS 저장링의 파라미터는 표1에 나타난 것과 같다.

표 1. Major storage ring parameters

Lattice Type	TBA
Nominal Energy	2-2.5 GeV
Superperiod	12
Circumference	276m
Mean Radius	43.9m
Harmonic Number	462
RF Frequency	501.8 MHz
Natural Emittance	13.1mm · rad
Natural Chromaticity (h/v)	-22.7/-16.6
Betatron Tunes(h/v)	14.28/8.18
Beta Functions(h/v)	
Maximum	11.1/19.8(m)
Minimum	0.94/2.37(m)
At ID symmetry point	10/4(m)
Beam Size at ID Symmetry Point	
Horizontal	0.361(mm)
Vertical(coupling constant r=1)	0.162(mm)
Maximum Dispersion	0.506(m)
Momentum compaction	0.001969
Dipole Length	1.2(m)
Dipole Field	0.97/1.21(T)

2.1 자석격자(Magnet Lattice)

저장링 설계시 우리는 작은 수평 emittance, 유연성(flexibility), 그리고 각종 오차에 대한 불감성(insensitivity)를 목표로 하였다. 또 2.5GeV시에 가속세기가 최대값이 4극자석의 경우 15T/m, 6극자석의 경우 250T/m²이하가 되도록 4극과 6극 자석의 길이를 정했다. 그래서 자석의 길이 및 저장링의 원주가 일반 2GeV의 저장링보다는 길다.

2개의 4극 자석을 dispersion이 없는 부분에, 3개의 4극 자석을 dispersion이 있는 부분에 배치하였는데(2-3 방식, 그림1) 이렇게 함으로써 가운데 휨자석의 dispersion 값에 다양한 변화를 줄 수 있고 거울 대칭점(mirror symmetry)에서의 betatron 함수를 조절하는 여분의 자유도로 tune의 변화를 쉽게

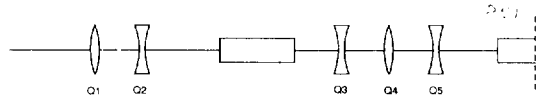


그림 1. Two-three arrangement of quadrupoles in the half TBA cell,

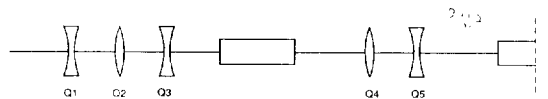


그림 2. Three-two arrangement of quadrupoles in the half TBA cell,

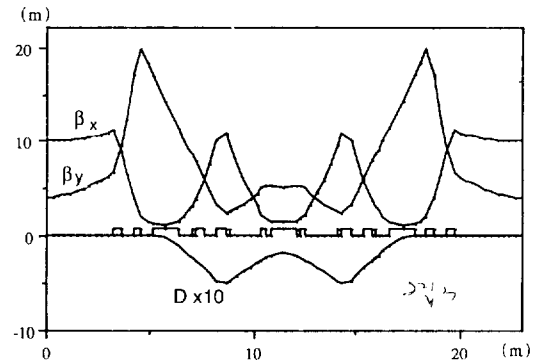


그림 3. Lattice functions through one unit cell,

표 2. Magnet lattice parameters

Element	Length(m)	Strength (at 2/2.5GeV)
L0	3.3	
Q1	0.4	10.715/13.394 (Tm ⁻¹)
L1	0.5	
Q2	0.4	-10.364/-12.955 (Tm ⁻¹)
L2	0.55	
B	1.2	0.9703/1.213 (T)
L31	0.55	
SD	0.2	-112.9/-141.1 (Tm ⁻²)
L32	0.1	
Q3	0.4	-3.810/-4.763 (Tm ⁻¹)
L4	0.55	
Q4	0.6	9.337/11.671 (Tm ⁻¹)
L51	0.1	
SF	0.2	61.9/77.4 (Tm ⁻²)
L52	1.4	
Q5	0.2	-8.623/-10.799 (Tm ⁻¹)
L6	0.25	
BG	0.6	0.9703/1.213 (T)

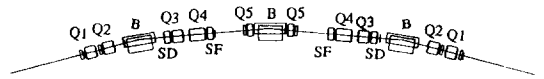


그림 4. Schematics of the storage ring one cell.

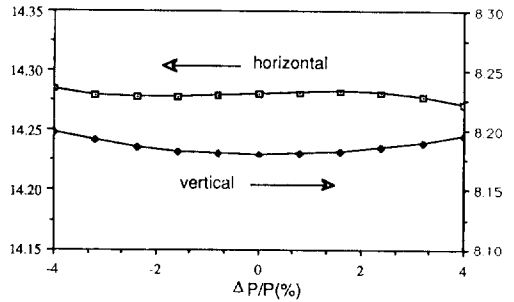


그림 5. Betatron tunes versus momentum.

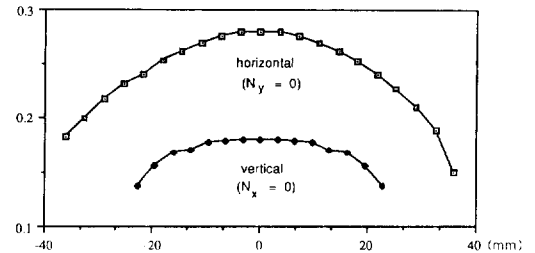


그림 6. Nonintegral part of tunes versus amplitudes.

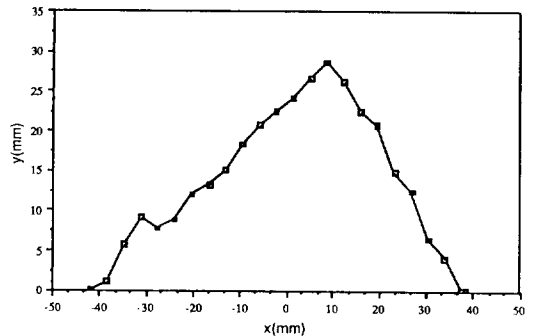


그림 7. Dynamic aperture without errors for $\Delta p/p = 0$.

할 수 있다. 또 위상변화도 자유로워 삽입장치 대칭점 (ID symmetry)에서의 betatron 함수값을 tune에 영향을 주지 않으면서 선택할 수 있게 된다. 다른 4극 자석 배치로 3-2 방식(그림 2)이 있는데 보통 이 모양을 많이 선택한다. 이 방식에 대한 연구는 이미 발표한 바 있다.³⁾

자석의 파라미터는 표 2에 있으며 베타트론과 dispersion 함수가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3에서 수직, 수평 베타트론 수의 최대값이 각각 20m, 11m 정도임을 알 수 있다.

2.2 색수차교정과 역학적구경(Chromaticity Correction and Dynamic Aperture)

빔의 운동량에 따라 빔의 궤적이 틀려지고 tune이 바뀌게 된다. 이것을 무차원 양 $\xi = \frac{\Delta\nu/\nu}{\Delta p/p}$ 로 표시한 것을 자연색수차(natural chromaticity)라고 한다. 이 자연 색수차는 보통 음수 값을 갖고 있으며 이것을 6극 자석을 써서 0으로 교정해 주어야 머리-꼬리 불안정성(head-tail instability)을 방지할 수 있다.

우리는 한 컬레의 6극 자석(SD, SF) = (-6.77 m⁻², 3.71m⁻²)을 써서 자연 색수차(ξ_x, ξ_y) = (-22.

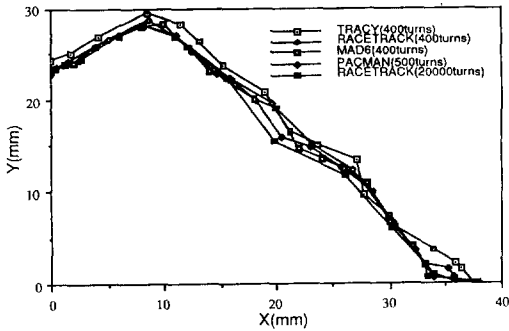


그림 8. A comparison of dynamic aperture with different tracking codes and tracking turns.

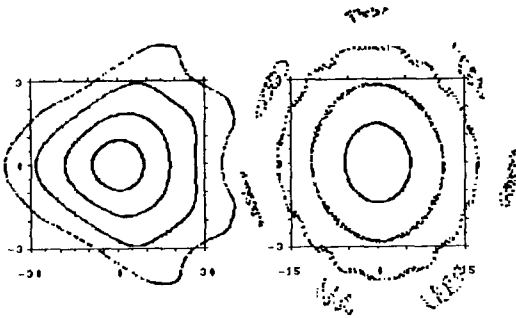


그림 9. Horizontal and vertical phase space trajectories at the ID symmetry.

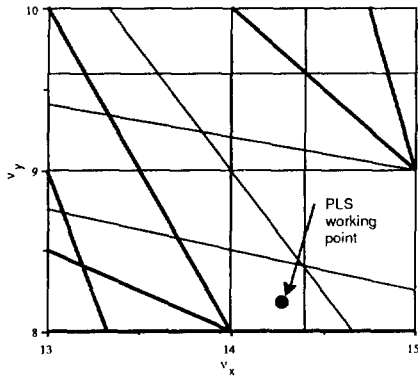


그림 10. Tune diagram showing resonance lines up to order 6.

71, -16.59)을 교정해 주며 이때 운동량에 따른 tune의 변화가 그림 5에 잘 나타나 있다. 또 전자의 진폭에 따른 변화는 다음과 같이 구하여 졌다.

$$\Delta\nu_x = -823 \cdot 2J_n - 2730 \cdot 2J_y$$

$$\Delta\nu_y = -2730 \cdot 2J_n - 177 \cdot 2J_y$$

여기서 J_x, J_y 는 수평, 수직방향의 action변수들이다. 그림 6은 PATRICIA를 이용하여 1000회전 시켜 얻은 결과를 보여준다.

역학적으로 비선형 요소인 6극 자석에 의해 안정 영역(stable region)에 경계(boundary)가 생기게 되며 이 경계선 혹은 나뉘는 선(separatrix)의 안쪽을 역학적 구경이라 한다. 역학적 구경 밖의 전자는 아무런 소용이 없으며 수평 방향의 역학적 구경이 커야

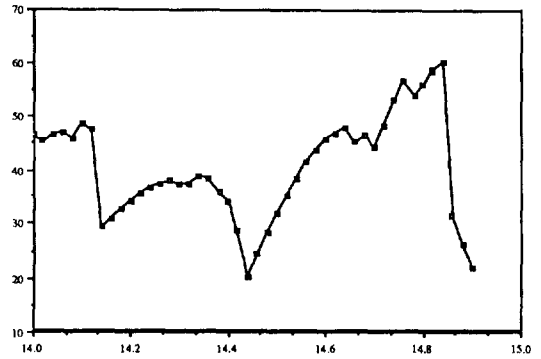


그림 11. Horizontal dynamic aperture for zero coupling versus horizontal tune ($\nu_y=8, 18$).

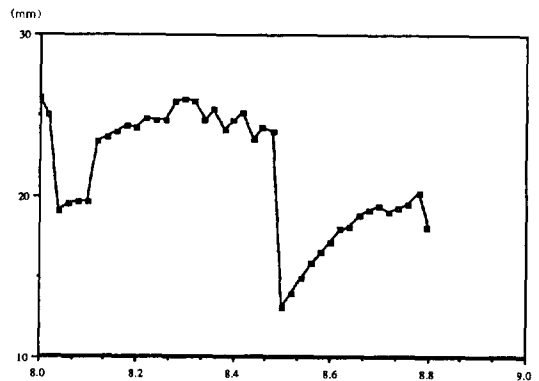


그림 12. Vertical dynamic aperture for full coupling versus vertical tune ($\nu_x=14, 28$).

빔의 사입(injection)시 문제가 없게 된다. 또한 역학적 구경이 작을 때 빔의 산란(scattering) 및 ion trapping 효과가 커져 빔의 수명이 크게 줄어 든다. 그림 7은 PLS 저장링의 오차가 없을 때의 역학적 구경을 500회전에 대해 PACMAN으로 구한 것이며 그림 8은 여러 가지 추적 코드로 구한 역학적 구경을 비교한 것이 그림 9는 삼입장치 대칭점에서의 수평 수직 방향의 phase space 궤적을 그린 것이다. 그림 10은 tune diagram이고 그림 11과 12는 수평과 수직 tune에 대한 역학적 구경의 수평, 수직 방향의 크기 변화를 각각 보여 주고 있다. 그림 10에서 우리의 작동점(working point), $(\nu_x, \nu_y) = (14.28, 8.18)$ 근처에 다음과 같은 5차 공진선들(fifth order resonance lines)이 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} 5\nu &= 12.6 \\ 3\nu_x + 2\nu_y &= 12.5 \\ 4\nu_x + \nu_y &= 12.4 \end{aligned}$$

이러한 공진선들은 안정된 작동을 위한 전자의 진폭에 상한을 주게 되는데 그림 11, 12에서 볼 수 있는 역학적 구경의 급격한 감소는 그 증거가 된다. 그림 9의 5각형 모양에서도 5차 공진 효과를 확인할 수 있다.

2.3 다극오차(Multipole Errors)

자석은 두가지 이유에 의해 다극 오차를 갖게 되는데 그 첫번째는 크기의 유한성 때문에 생기는 구조적 오차이고 두번째는 제작 기술의 불완전성에 기인하는 무작위적 오차(random error)이다. 이 절에

서는 이러한 오차가 역학적 구경에 끼치는 영향을 알아 보았다. 추적 코드 MAD에서는 이러한 다극 성분을 다음과 같은 자기장의 전개방법에 의해 고려한다.

$$B_y(x, \phi) = B\rho \sum_n \frac{k_n x^n}{n!} \cos\{(n+1)\phi + \delta\}$$

여기서 k_n 은 다극 성분의 진폭이고 ϕ 는 빔의 축에 대한 각도, δ 는 기울어짐을 나타내는 초기각이다. 우리는 여기서 SRRC의 자료(표3)을 이용하였다. 우리의 횡자석은 복합기능이 아니기 때문에 횡자석에서의 무작위적 4극 성분을 10^7 으로 바꾸어 주었다.

그림 13은 표3의 모든 오차가 고려된 10개의 다른 기계에서 역학적 구경이 줄어드는 모습을 보여준다.

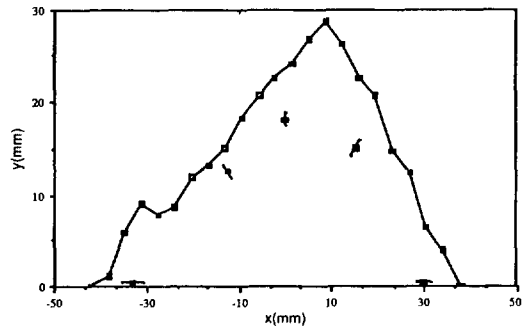


그림13. Dynamic aperture for all systematic and random errors in Table 3. The data points and error bars represent the average dynamic aperture and the rms spread of the dynamic aperture for 10 different machines, respectively.

표 3. Input parameters for multipole error simulations

	$k_1 l$	$k_2 l$	$k_3 l$	$k_4 l$	$k_5 l$	$k_9 l$
Systematic						
Dipoles	0.0	0.087	0.0	1743.0	0.0	0.0
Quadrupoles	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5×10^5	1.5×10^{12}
Random/Normal						
Dipoles	10^{-7}	0.174	26.1	174.	0.0	0.0
Quadrupoles	10^{-3}	0.1	15.0	300.0	3×10^4	5×10^{11}

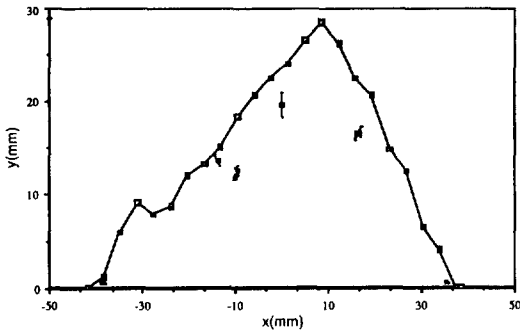


그림14. Dynamic aperture for systematic and random sextupole components in the dipole, $|k_2| = 0,087\text{m}^{-2}$, $(k_2/l)_{\text{rms}} = 0,174\text{m}^{-2}$.

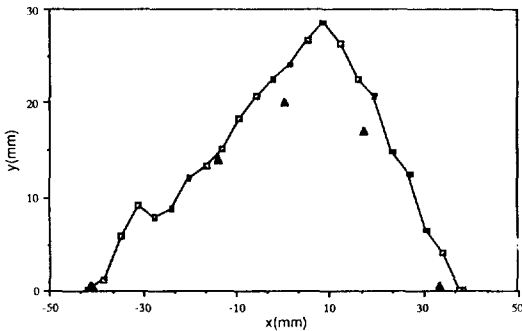


그림15. Dynamic aperture for systematic and random dodecapole components in the quadrupoles, $|k_5/l| = 1,5 \times 10^5$ and $(k_5/l)_{\text{rms}} = 3 \times 10^4$.

이 그림의 자료는 한 기계에서 400회 회전하도록 MAD로 simulation하여 얻은 것이다. 그림 14와 15

는 6극과 12극의 오차가 각각 2극과 4극 자석에 있을 때의 역학적 구경이다.

2.4 유연성(Flexibility)

Q3, Q4, Q5의 크기를 잘 조절함으로써 거울 대칭점에서의 dispersion 값을 매우 큰 폭으로 조절할 수 있고 또 achromat 부분에 대한 tune의 변화를 쉽게 바꿔줄 수 있어 tune의 영향을 주지 않으면서 삽입 장치 대칭점에서의 베타트론 값들을 마음대로 정할 수 있다고 말한 바 있다. 우리는 이것을 표4에서 알 수 있다. 여기서 6극 자석의 크기와 베타트론의 최대 값들은 모두 낮은 것에 반해 emittance는 다소간 변함을 알 수 있다.

2.5 닫힌 궤도의 수정 (Closed Orbit Correction)

닫힌 궤도의 수정에 우리는 60개(cell당 5개)의 수평 수정자와 84개(cell당 7개)의 수직 수정자, 그리고 96개(cell당 8개)의 monitor를 사용하였다. 그림 16이 보여주듯이 한 cell에 있는 두 개씩의 수평 수정자와 수직 수정자는 6극 자석에 수정 코일을 감는 방법으로 배치하였다. 이 측정에서 우리는 4극 자석의 위치오차에 0.15mm, 2극 자장 오차($\Delta B/B$)에 1×10^{-3} , 그리고 2극 자석 회전오차에 0.5mrad의 값을 넣었다. 그리고 이러한 오차값들을 만들어내는 random number는 2σ 에서 끊어지는 Gauss분포를 사용하였다. 궤도가 변한 양의 제곱평균 제곱근의 수정 전과 수정 후 분포를 그림 17과 18이 보여주고 있다. 이 수정작업에서 수정자의 세기는 1mrad를 넘지 않는다.

표 4. List of various betatron values at the ID symmetry point and other parameters.

Lattice	Tune(ν_x, ν_y)	$(\beta_x \beta_y)$ at the ID symm,	Max. $(\beta_x \beta_y)$	Sextupole strength(m^{-2})	Emittance ($\text{m} \cdot \text{rad}$)
1	14, 28, 8, 18	12, 4	12, 9, 19, 6	-7, 7, 4, 2	$1,50 \times 10^{-8}$
2	14, 28, 8, 18	10, 4	11, 1, 19, 8	-6, 8, 3, 7	$1,31 \times 10^{-8}$
3	14, 28, 8, 18	8, 4	11, 1, 20, 0	-5, 9, 3, 3	$1,55 \times 10^{-8}$
4	14, 28, 8, 18	6, 4	11, 3, 20, 4	-5, 1, 2, 9	$1,90 \times 10^{-8}$
5	14, 28, 8, 18	4, 5, 5, 5	12, 0, 22, 0	-3, 9, 2, 5	$2,22 \times 10^{-8}$
6	14, 28, 8, 18	2, 5, 2, 5	10, 5, 22, 3	-4, 2, 2, 5	$3,08 \times 10^{-8}$

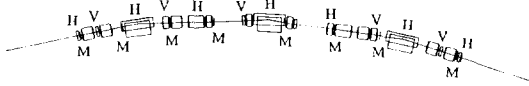


그림16. Monitors and correctors for one cell of the storage ring.

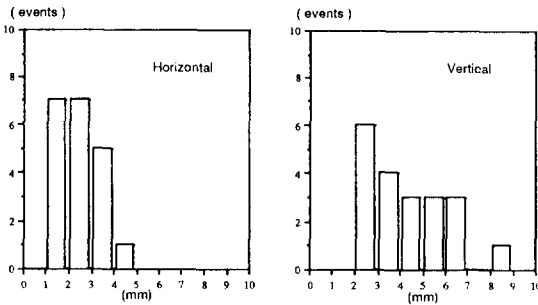


그림17. RMS orbit distortions produced by 20 sets of random errors before correction.

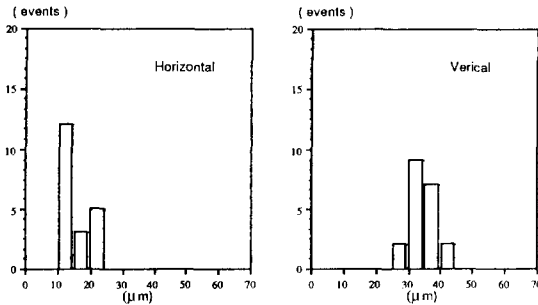


그림18. RMS orbit distortions produced by 20 sets of random errors after correction.

그림 19, 20은 한 set의 오차에 대해 수정 전과 수정 후 monitor가 읽는 값을 보여 주고 있다. 또 그림 21은 monitor 위치 오차의 제곱평균 제곱근의 값이 0.15mm라고 가정하였을 때 수정 후 monitor가 읽는 변화된 달린케도 값을 보여주고 있다. 그림 22, 23은 수정 전과 후의 tune 퍼짐(tune-spread)이다.

수정 전과 수정 후의 역학적 구경을 20개의 다른 모델을 써서 계산하여 그 결과를 그림 24로 나타냈다. 이 수정에 이용된 수정자들의 최대값과 제곱평균 제곱근 값을 표 5에 적어 놓았다.

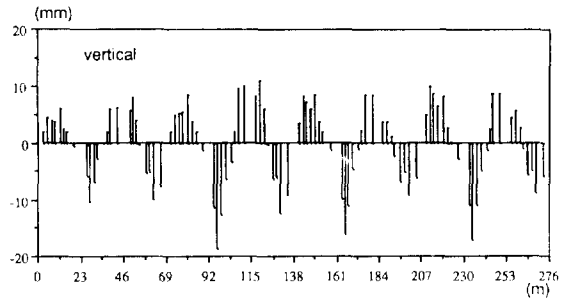
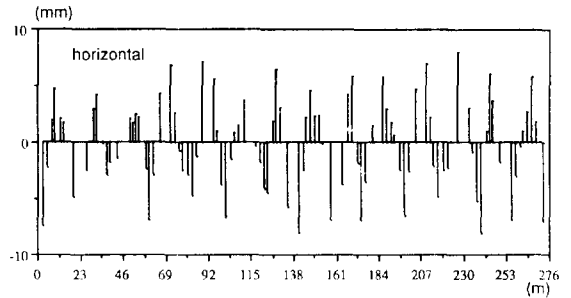


그림19. Orbit errors at monitors for the entire machine before correction for one set of random errors.

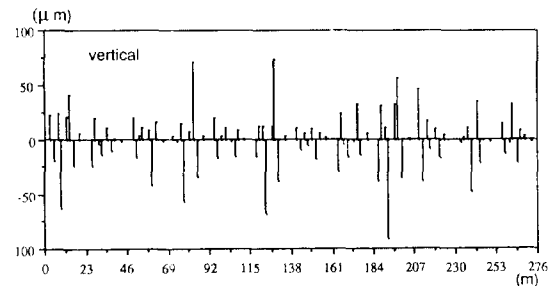
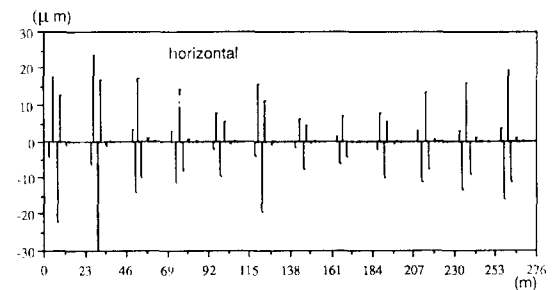


그림20. Orbit errors at monitors for the entire machine after correction for one set of random errors.

각 오차에 대해 어느정도 민감한지를 알기 위해

여러 오차의 조합들에 대한 20번의 simulation을 하여 그 평균 값을 표 6으로 만들었다. 표 6으로 우리

표 5. Maximum and rms corrector strengths.

	Horizontal Max/rms (mrad)	Vertical Max/rms (mrad)
Without monitor error	0.372/0.105	0.385/0.095
With monitor error	0.739/0.192	0.442/0.131
Without tilt and field error	0.256/0.082	0.329/0.083
Without quadrupole displacement error	0.321/0.072	0.177/0.039

표 6. Maximum orbit distortions before and after correction

	Horizontal Maximum Error (before/after) (mm)	Vertical Maximum Error (before/after) (mm)
Without monitor error	11.0/0.11	22.2/0.22
With monitor error	11.0/0.63	22.2/0.51
Without tilt and field error	9.3/0.10	18.2/0.19
Without quadrupole displacement error	2.77/0.06	7.72/0.13

표 7. Comparison of closed orbit errors measured at monitors and at every element.

	At monitors only before/after (mm)		At every element before/after (mm)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Without monitor error	2.73/0.009	4.13/0.026	2.60/0.131	4.27/0.122
With monitor error	2.73/0.048	4.14/0.082	2.60/0.131	4.27/0.122
Without tilt and field error			2.39/0.017	4.21/0.030
Without quadrupole displacement error			0.66/0.009	1.17/0.015

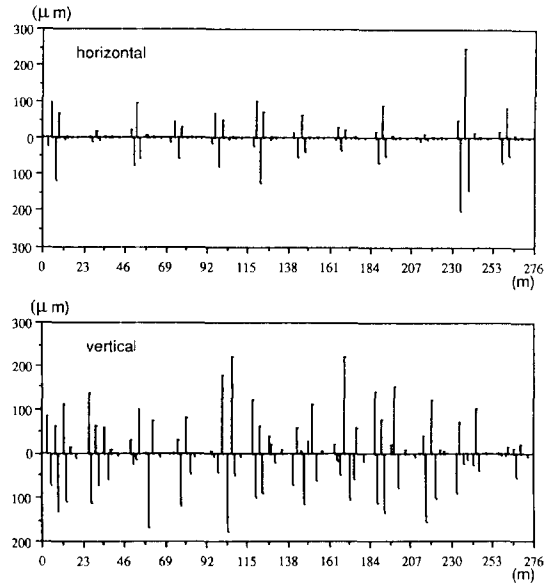


그림 21. Orbit errors at monitors after correction with monitor displacement errors.

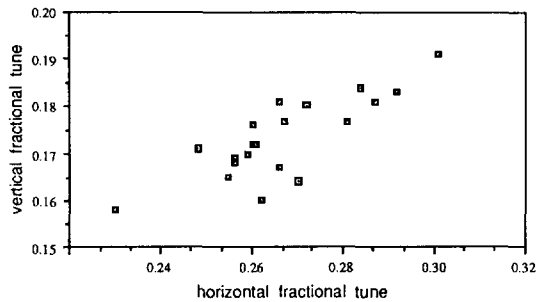


그림 22. The tune-spreads for 20 different rings before correction.

표 8. Comparison of closed orbit errors at monitors only and at every element in terms of ϵ .

	Horizontal ϵ before/after	Vertical ϵ before/after
Without monitor error	5.0%, 52.6%	3.28%, 23.5%
With monitor error	5.0%, 41.5%	3.04%, 32.8%

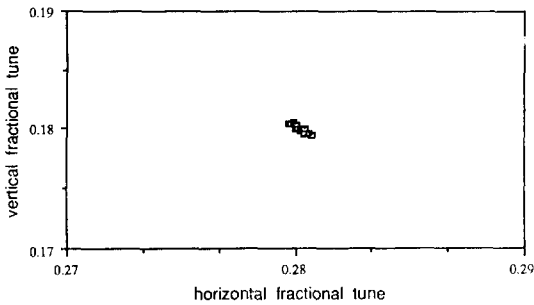


그림 23. The tune-spreads for 20 different rings after correction.

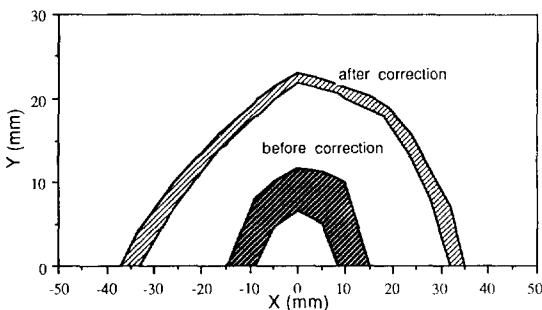


그림 24. Dynamic apertures before and after closed orbit correction.

는 4극 자석의 위치 오차가 닫힌 궤도의 오차에 가장 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 표 7은 닫힌 궤도의 오차를 monitor 위치에서만 제어하고 또 모든 요소에서 제어본 값을 보여준다.

CO를 모든 요소에서의 닫힌 궤도 평균값이라고 하고 CO_{mon} 을 monitor에서 만의 그것이라 하고

$$\epsilon = \frac{CO - CO_{mon}}{CO}$$

와 같이 ϵ 을 정의하면 ϵ 은 닫힌 궤도의 오차를 monitor로 측정함에 있어서의 효율을 나타내게 된다. 표 8이 그 결과이다.

3. 결 론

우리는 이 논문에서 포함 방사광 가속기의 저장링 자석 격자 구조의 각종 파라미터와 성질들을 제시했다. 충분한 역학적 구경을 가지고 있는 것으로 보여졌으며 각종 자석의 오차에 대해 상대적으로 덜 민감하다고 생각되어진다. 앞으로 이 격자에 대한 빔의 군집효과(collective effects)에 관한 연구가 진행될 것이다.

참 고 문 헌

- 1) B. Simon, R. Maier, G. Wustefeld, Analysis of the triplet bend achromat as a lattice for BESSY II, 1988.
- 2) K. Nam, M. Yoon, J. Choi, and S. J. Hahn, PLS Report BD 88-07.
- 3) K. Nam, M. Yoon, J. Chhoi, and S. J. Hahn, PLS Report BD 89-01.