

포항방사광가속기의 다극 위글러용 고 열량부하 슬릿

길계환* · 김창균 · 정진화

포항공과대학교, 포항가속기연구소, 포항 790-784

(2006년 3월 17일 받음)

포항가속기연구소의 HFMX (High Flux Macromolecular X-ray crystallography) 빔라인은 다극 위글러의 방사광을 이용한다. 따라서 고 열량부하에 적합한 두 개의 수평 및 수직 슬릿이 빔라인의 프론트엔드 영역에 설치되었다. 빔 산란을 피하면서 고 열량부하를 처리하기 위하여, 빔을 차단하는 수평 슬릿의 두 글리드콕 블록은 수직면 상에서 기울어진, 10°의 스킴각 경사면 구조를 이루고 있다. 글리드콕 블록들은 두 개의 구동막대에 의해서 궤도대를 따라 각각 병진함으로써 슬릿의 간격을 조정한다. 구동막대 내부에 가공된 유로를 통하여 흐르는 냉각수가 두 블록의 열량부하를 냉각시킨다. 수직 슬릿은 진공용기에 대한 설치 방향과 스킴각 경사면 구조의 경사각만 다를 뿐 수평 슬릿과 동일한 구조를 가지고 있다. 블록들이 궤도대 상에서 정밀하게 조정되므로 두 블록 간의 정렬이 필요치 않은 장점이 있으며 설치된 슬릿들은 안정적인 작동 성능을 보이고 있다. 또한, 두 슬릿의 냉각 성능도 만족할 만한 것으로 나타났다. 본 논문에서는 두 슬릿의 설계에 대한 상세한 설명이 제시되고 그 작동 성능을 검토한다.

주제어 : 다극 위글러, 고 열량부하, 슬릿, 스킴각 경사면 구조

I. 서 론

포항방사광가속기 HFMX 빔라인의 방사광원은 극수(number of poles)가 28인 다극 위글러 (multi-pole wiggler)이다. 프론트엔드로 진입한 다극 위글러의 방사광은 시준거울에 입사하기 전에 방사광의 외곽 부분이 고정형 수직 마스크와 고정형 수평 마스크로 차단된다. 이어서 방사광의 폭을 정의하는 수평 슬릿과 방사광의 높이를 정의하는 수직 슬릿이 다극 위글러 방사광 중앙 부분의 고밀도 방사광만을 하류로 통과시키게 되는데, 이때 산란된 방사광이 시준거울에 진입하지 않도록 배제하여야 한다.

Fig. 1에 나타나 있듯이, 포항방사광가속기 삽입장치 빔라인의 프론트엔드 구간에서, 저장링 진공용기의 방사광 출구로부터 콘크리트 방호벽까지의 길이는 5.8 m이다. 프론트엔드 구간에 1.4 m 길이의 시준거울 진공용기를 위치시키는 HFMX 빔라인의 광학설계는 프론트엔드 구간의 다른 장치들에 대한 공간을 더욱 제한적으로 만들었다. 따라서 슬릿을 포함하여 다극 위글러의 방사광에 대한 냉각 장치들의 냉각면 경사각을 임의로 낮출 수 없으므로 슬릿 설계에 있어서 다극 위글러로부터의 열량부하와 슬릿의 냉각 성능에 대한 깊이 있는 고찰이 필요하게 된다.

슬릿을 설계함에 있어서 산란된 방사광이 하류의 실험 영역으로 진입하지 못하도록 회전된 스킴각 경사면 구조 (grazing-incidence knife-edge configuration)를 채택하는 것이 근본적이다 [1,2]. 여기서 회전된 스킴각 경사면 구조란 일반적인 스킴각 경사면 구조와 달리, Fig. 2와 같이, 방사광을 수평적으로 정의하는 수평 슬릿은 그 경사면이 수직면 상에서 그리고 방사광을 수직적으로 정의하는 수직 슬릿은 그 경사면이 수평면 상에서 기울어진 스킴각 경사면 구조를 말한다.

일반적으로, 회전된 스킴각 경사면 구조를 가진 슬릿의 두 냉각블록은 각각의 조립체로 만들어져 각기 독립적으로 설치·제어된다 [1,2]. 본 연구에서는 회전된 스킴각 경사면 구조를 채택하면서 두 냉각블록을 일체의 조립체 내에 배치하고 궤도대 상에서 구동되도록 함으로써, 가용한 공간에 적합한 크기의 밀집된 구조의 새로운 슬릿을 포항방사광가속기의 다극 위글러용으로 개발하였다. 개발된 슬릿은 두 냉각블록이 궤도대 상에 조립되어 있어 기계적으로 안정하게 작동하고, 두 냉각블록 간의 정렬이 필요치 않아 하나의 슬릿에 포함된 두 냉각블록의 관리성이 향상되는 장점이 있다.

본 논문에서는 수평 슬릿과 수직 슬릿의 설계를 상세히 기술하고, 측정된 슬릿의 온도 및 스크린 모니터 상의 빔 단면으로부터 슬릿의 작동 성능을 검토한다.

* [전자우편] khgil@postech.ac.kr

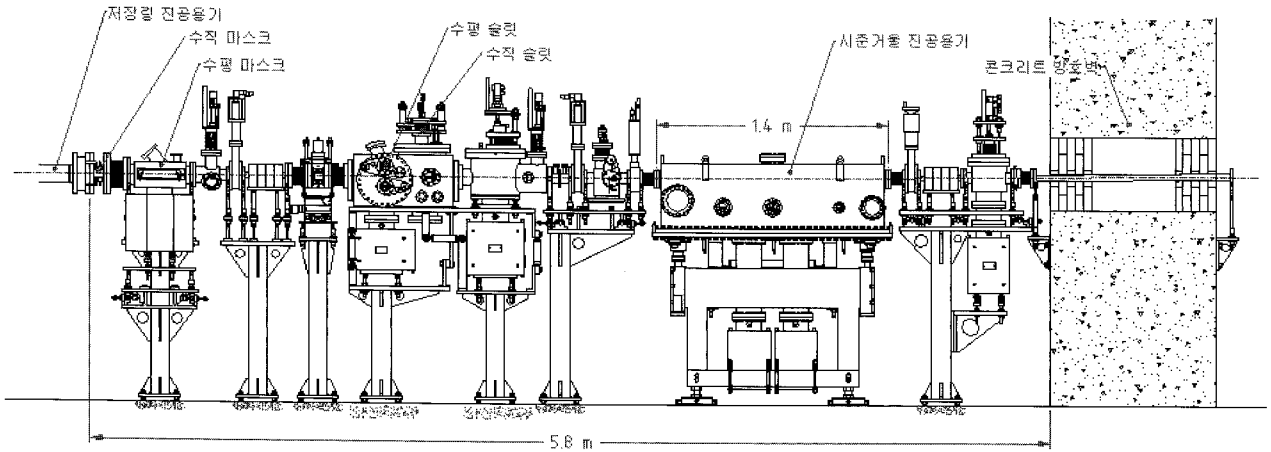


Fig. 1. HFMX 빔라인 프론트엔드의 입면도.

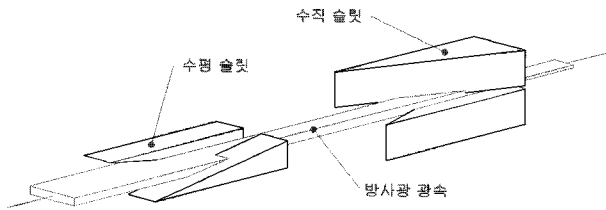


Fig. 2. 회전된 스팀작 경사면 구조의 수평 슬릿 및 수직 슬릿의 개략도.

II. 슬릿의 설계

2.1 슬릿의 열량부하

다극 위글러의 전체 열량률은 9.5 kW에 이르고 최대 열량률 강도는 3.6 kW/mrad²이다. 슬릿의 냉각블록 상의 최대 표면 열량률 강도 (W/mm²)는 다음 식으로 계산할 수 있다 [3]:

$$W_{xy} = 1.076 \times 10^{-2} B_0 E^4 I N / l^2 \quad (1)$$

여기서, B_0 (T)는 자기장의 세기, E (GeV)는 저장링 에너지, I (mA)는 저장링 전류, N 은 극수 그리고 l (m)은 다극 위글러 원점으로부터의 거리이다.

식 (1)에 의해 계산하면 저장링 운전조건이 2.5 GeV 및 300 mA일 때, 다극 위글러로부터 10.8 m에 위치하는 수평 슬릿에서는 30.6 W/mm² 그리고 11.0 m에 위치하는 수직 슬릿에서는 29.4 W/mm²의 최대 열량률 강도가 계산된다. 한편, 수평 슬릿과 수직 슬릿의 간격이 각각의 정상 간격인

±8.25 mm와 ±1.3 mm일 때 두 슬릿에서 흡수되는 열량률은 각각 2.29 kW와 0.56 kW에 이른다.

2.2 슬릿의 구조

Fig. 3에 조립된 수평 슬릿의 사진이 나타나 있다. 방사광 중심을 중심으로 두 개의 글리드콕 (Glidcop) 재질의 냉각블록들 (1과 1')이 나란히 배치되어 있다. 각 냉각블록의 방사광에 대한 전면과 후면의 하부에는 각각 하나의 궤도대 (2)가 볼팅되어 있고, 이 궤도대들은 고정판 (3)에 안착되어 있는 바깥쪽의 두 개의 긴 궤도대 (4)와 접촉하여 유연하게 병진할 수 있다. 고정판은 주 플랜지 (5)에 볼팅된 지지대 (6)에 조립되어 있다. 두 냉각블록은 스테인리스 스틸 재질의 연결판 (7과 7')과 냉각수로 부분에서 진공 브레이징되어 있으며, 이어서 이 연결판들은 각각에 TIG 용접된 구동막대 (8과 8') 종단의 특수 ICF 70 플랜지들을 통하여

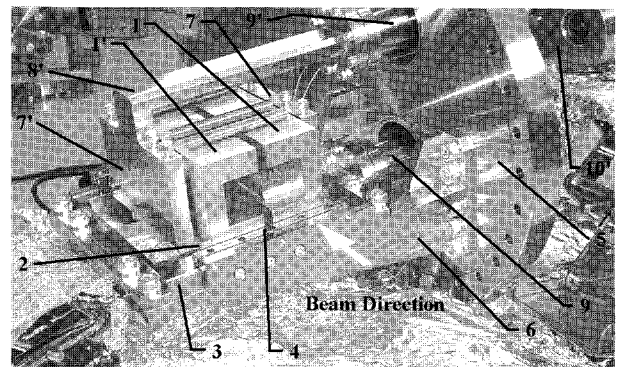


Fig. 3. 조립된 수평 슬릿. 하부의 구동막대 (8)와 z-스테이지 (10)는 각각 고정판 (3)과 주 플랜지 (5)에 가려 그림에 나타나 있지 않다.

여 각각의 감축 니플 (9와 9')과 연결되어 있다. 각 감축 니플의 종단 ICF 114 플랜지는 각각의 z-스테이지 (10과 10')에 볼팅되어 있다. 이리하여 각 냉각블록은 z-스테이지에 워프로 연결된 스테핑 모터에 의해서 방사광의 좌우로 각각 구동된다.

Fig. 4에 수평 슬릿의 냉각블록과 그 연결판의 3차원 모델이 나타나 있다. 방사광이 입사하는 경사면은 방사광의 열량률 강도를 줄이기 위하여 냉각면의 경사각을 낮출수록 좋으나 냉각면의 길이가 길어지게 되므로, 가용한 공간을 고려하여 수평 슬릿의 경우에는 냉각면의 경사각을 10°로 설정하였다. 수직 슬릿은 수평 슬릿 후방에 위치하여 수평 슬릿에 의해서 폭이 좁아진 방사광 광속을 받아들인다. 수평 슬릿을 통과하더라도 방사광의 최대 폭은 20.5 mm에 이르므로, 이를 포괄하면서 부품의 구조 및 크기를 수평 슬릿과 통일하기 위하여 수직 슬릿의 냉각블록의 경사각은 15°로 설정하였다. 이러한 두 경사각을 고려하면 수평 슬릿 및 수직 슬릿의 최대 표면 열량률 강도는 각각 5.31 W/mm²와 7.61 W/mm²가 된다. Fig. 5에 제작되어 조립 중인 수직 슬릿의 사진이 나타나 있다.

Fig. 4와 같은 회전된 스침각 경사면 구조의 끝은 입사된

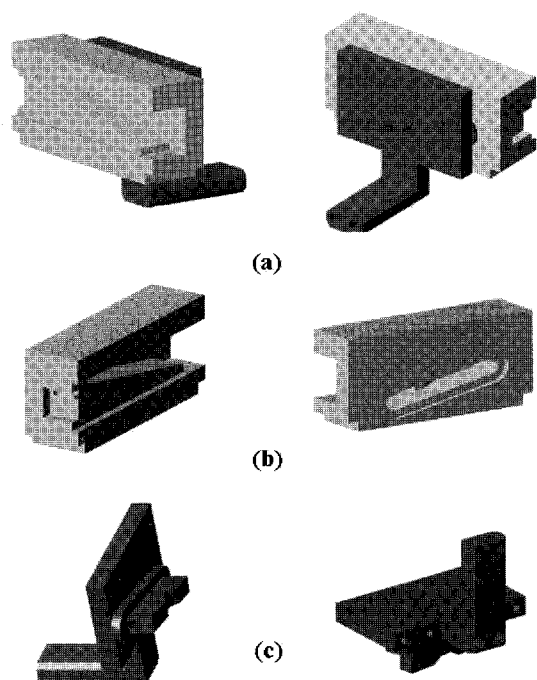


Fig. 4. 수평 슬릿의 냉각블록 및 이에 대응하는 연결판의 3차원 모델; (a) 냉각블록과 연결판의 조립체, (b) 냉각블록 그리고 (c) 연결판. 이 냉각블록과 연결판은 주 플랜지에 가까운 쪽의 것이다.

방사광이 하류로 산란되지 않고 경사 끝 내부에 가두어지는 효과를 나타낼 것으로 기대된다. 냉각블록의 후면에는 경사면과 평행하게 냉각수로가 밀링 가공되어 있다. 이 수로에 대응하는 연결판이 끼워지고 그 접촉면에서 진공 브레이징된다. 각 슬릿의 한 쌍의 냉각블록 중, 주 플랜지에 가까운 쪽의 냉각블록은 하부로부터 상부로 올라가는 경사를 가지고 있고 주 플랜지로부터 먼 쪽의 냉각블록은 상부로부터 하부로 내려가는 경사를 가지고 있다. 이러한 구조는 두 냉각블록의 냉각수로를 방사광 중심면에 대하여 대칭적으로 배치함으로써 각 냉각블록의 냉각계통 역시 방사광 중심면에 대해 대칭적으로 구성되도록 하기 위함이다.

연결판은 스테인리스 스틸 304L 재질이다. 연결판은 냉각블록에 냉각수를 공급·배출하는 중간 통로 역할을 담당함과 아울러 냉각블록에 변위를 공급하는 역할을 수행한다. 연결판에는 냉각블록에 냉각수를 공급하는 수로와 냉각블록으로부터 냉각수를 배출시키는 수로가 각각 가공되어 있다.

2.3 슬릿의 간격 범위

정상 상태에서 수평 슬릿은 1.5 mrad의 방사광을 그리고 수직 슬릿은 0.24 mrad의 방사광을 시준거울로 통과시

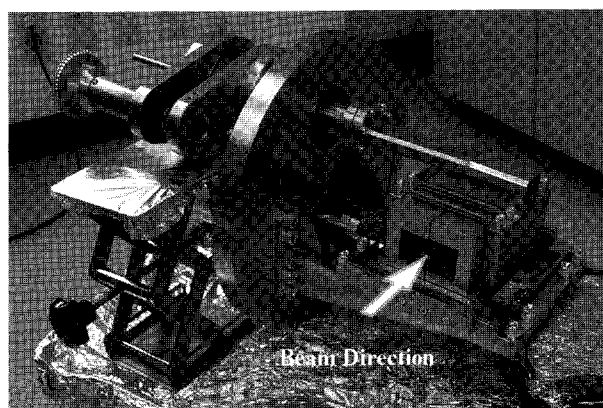


Fig. 5. 조립 중인 수직 슬릿. 모터 및 냉각수 계통 등은 아직 조립되지 않은 상태이다.

Table 1. 수평 슬릿과 수직 슬릿 간격의 범위.

간격 범위	수평 슬릿	수직 슬릿
최소 간격	±5.25 mm (0.973 mrad)	±0.8 mm (0.145 mrad)
정상 간격	±8.25 mm (1.529 mrad)	±1.3 mm (0.236 mrad)
최대 간격	±10.25 mm (1.900 mrad)	±2.6 mm (0.472 mrad)

키도록 한계스위치로 최대 간격과 최소 간격이 설정되어 있다. Table 1에 두 슬릿 간격의 범위가 요약되어 있다.

III. 냉각블록의 온도 측정 및 고찰

수평 슬릿과 수직 슬릿에는 방사광에 기인하는 온도 상승을 측정하기 위하여 각각 1개의 K형 열전쌍이 부착되어 있다. 열전쌍은 각 슬릿의 두 냉각블록 중 주 플랜지에 가까운 쪽의 냉각블록에 장착되어 있다. Fig. 6의 냉각블록 절단면의 그림에 열전쌍을 조립하기 위하여 가공된 나사구멍이 나타나 있다. 열전쌍의 두 전선의 단락을 피하면서 열전쌍 전단을 열전쌍 나사구멍의 종단에 밀착하기 위하여 Fig. 6의 오른쪽 그림과 같은 두 개의 세라믹 봉과 중공이 있는 나사가 이용되었다. 열전쌍에서 인출된 두 전선은 지

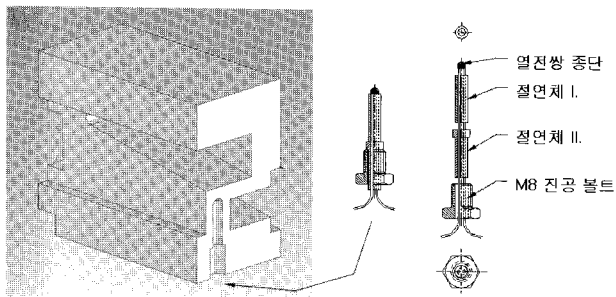


Fig. 6. 열전쌍 조립 위치와 열전쌍의 부품들.

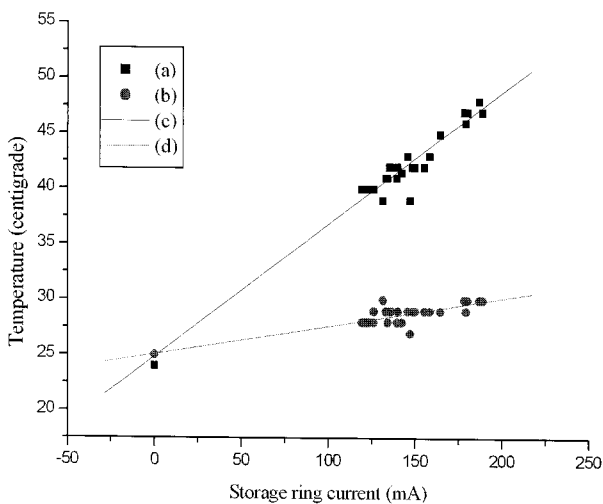


Fig. 7. 저장링 전류에 대한 수평 슬릿과 수직 슬릿 열전쌍의 온도 그래프; (a) 수평 슬릿 열전쌍의 온도, (b) 수직 슬릿 열전쌍의 온도, (c) 수평 슬릿 열전쌍 온도의 1차 근사 그리고 (d) 수직 슬릿 열전쌍 온도의 1차근사.

지대 하부에 부착된 전선 고정기를 경유하여 BNC 전기 피드쓰루로 연결된다. 열전쌍의 출력은 광자전송선 (photon transfer line) 구간에 있는 열전쌍 제어기에서 온도로 표시된다.

Fig. 7에 열전쌍에 의해서 측정된 수평 슬릿과 수직 슬릿의 온도가 저장링 전류에 대해서 도시되어 있다. 포항방사광가속기는, 190 mA 정도로 입사된 전자빔이 12시간에 걸쳐 120 mA 정도까지 감쇠되면 다시 재입사시키는, 순환 방식으로 저장링을 운용하고 있기 때문에 측정된 데이터는 이 저장링 전류의 구간에 집중되어 있다. 저장링 냉각수의 온도는 25 °C이며 측정된 수평 슬릿의 열전쌍 온도 (°C)를 1차함수로 근사시키면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{ther} \approx 0.120I + 25.0 \quad (2)$$

여기서, I (mA)는 식 (1)에서와 같이 저장링 전류이다. 한편, 수직 슬릿의 열전쌍 온도는 100 mA 당 2.6 °C 가량의 증가율을 나타내고 있으므로 방사광이 정상 간격 상태의 수직 슬릿에는 거의 열량부하를 부가하지 않는 것으로 보인다.

실제 방사광이 입사하는 냉각블록 표면의 온도를 유추하기 위하여, ANSYS 코드를 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 그 해석 결과에 의하면 저장링 전류에 관계없이 열전쌍 위치의 온도 상승분은 냉각블록 표면 온도 상승분의 42.4%에 이르므로 냉각블록 표면의 온도 (°C)는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$T_{surf} \approx 0.283I + 25.0 \quad (3)$$

식 (3)에 의하면 저장링 전류가 300 mA일 때 109.9 °C 정도의 냉각블록 표면 온도를 예상할 수 있다. 글리드콕의 내구 표면 온도 [4]인 300 °C보다 상당히 아래에 있음을 알 수 있다.

수평 슬릿이 최소 간격 상태일 때 방사광의 열량부하는 1.27배가량 늘어나나 방사광의 입사면적도 늘어나므로 냉각블록의 표면 온도는 열량부하 증가율보다 적게 상승할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 최소 간격 상태일 경우에도 냉각블록의 표면 온도는 글리드콕의 내구 표면 온도보다 낮은 온도 상태를 유지하게 된다.

Fig. 8에 HF MX 빔라인의 광자전송선 구간에 있는 스크린 모니터 상의 방사광 단면이 나타나 있다. 스크린 모니터의 스크린 판에는 인이 발려져 있어 방사광에 의한 형광을

4. 결 론

회전된 스침각 경사면 구조를 채택한 두 냉각블록을 궤도대 위에 배치하고 주 플랜지 측에서 두 냉각블록을 구동하여 간격을 조정하도록 설계함으로써 가용한 공간에 적합한 크기의 밀집된 구조의 슬릿을 개발하였다.

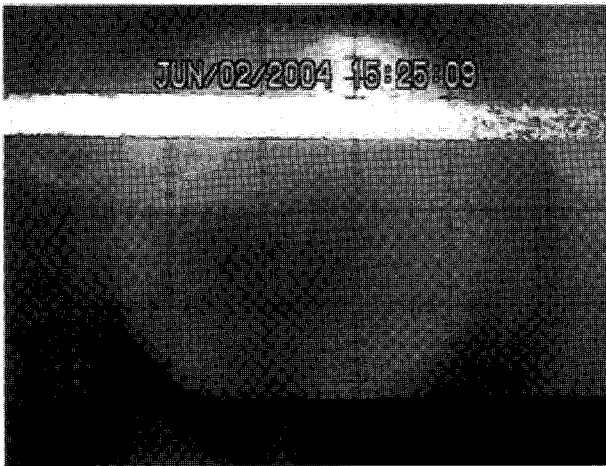
슬릿의 두 냉각블록은 포항방사광가속기 다극 위글러의 열량률 강도에 적합한 회전된 스침각 경사면 구조의 경사각을 가짐으로써 냉각블록의 크기가 과도하지 않으면서도 산란된 빔을 유효하게 차단하며, 냉각블록의 병진은 궤도대의 안내를 받아 안정적으로 이뤄짐으로써 슬릿에 필수적인 내진동 특성을 기대할 수 있다. 냉각수로를 구동막대 내부에 가공함으로써 구조를 단순하게 하였으며, 측정된 냉각블록의 온도로부터 설계·제작된 슬릿이 포항방사광가속기 다극 위글러의 방사광을 효과적으로 냉각시키고 있음을 알 수 있었다. 슬릿의 밀집된 구조는 수직 슬릿에도 동일하게 적용할 수 있었다.

감사의 글

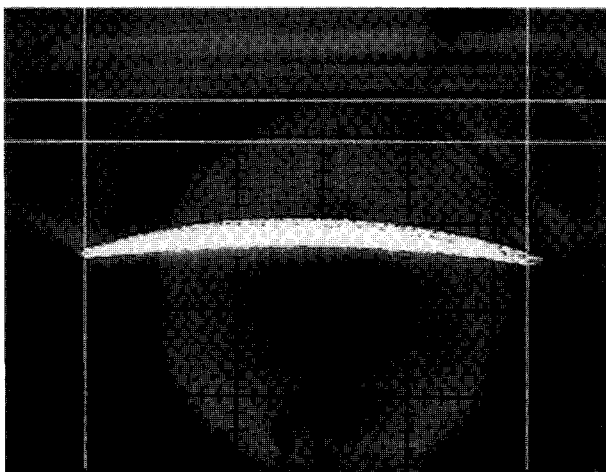
본 연구는 과학기술부가 지원하는 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] D. Shu, C. Brite, T. Nian, W. Yun, D. R. Haeffner, E. E. Alp, D. Ryding, J. Collins, Y. Li, and T. M. Kuzay, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 1789 (1995).
- [2] D. Shu, V. Tcheskidov, T. Nian, D. R. Haeffner, E. E. Alp, D. Ryding, J. Collins, Y. Li, and T. M. Kuzay, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 1792 (1995).
- [3] G. K. Shenoy, and P. J. Viccaro, "Energy and Angular Distributions of Radiation Power from Bending Magnet and Wiggler Sources at a 6-GeV Ring", ANL Report, LS-42 (1985).
- [4] S. Sharma, E. Rotela, and A. Barcikowski, "High Heat-Load Absorbers for the APS Storage Ring", MEDSI 2000, Villigen, July 2000.



(a)



(b)

Fig. 8. 광자전송선의 첫 번째 (a) 및 세 번째 (b) 스크린 모니터 상의 방사광 단면.

관찰할 수 있다. 스크린 판은 입사하는 방사광에 대하여 수평적으로 30°만큼 기울어져 있으므로 스크린 판에 나타난 방사광의 수평 크기는 실제보다 2배 확대된 것이다. Fig. 8의 (a)는 광자전송선의 첫 번째 스크린 모니터에서 관찰된, 시준거울을 통과한 방사광의 단면으로서 수평 슬릿이 최대로 열려져 있을 때의 경우이다. 수직 슬릿에 의해서 방사광의 높이가 명확하게 정의되어 있고 중심에서 먼 좌우의 부분에서 방사광의 강도가 약함을 알 수 있다. Fig. 8의 (b)는 방사광이 광자전송선의 복결정분광기와 집속거울을 통과한 후, 세 번째 스크린 모니터에서 관찰된 방사광 단면이다. 집속거울에 의해서 방사광이 집속되기 시작하여 방사광의 단면이 초승달 모양으로 변해가고 있다.

High Heat-load Slits for the PLS Multi-pole Wiggler

K. H. Gil*, C. K. Kim, and C. W. Chung

Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology Pohang 790-784

(Received March 17, 2006)

The HFMX (High Flux Macromolecular X-ray crystallography) beamline at Pohang Accelerator Laboratory uses beams from a multi-pole wiggler. Two horizontal and vertical slits relevant to high heat-load are installed at its front-end. In order to treat high heat-load with reducing beam scattering, the horizontal slit has two Glidcop blocks with a grazing incidence angle of 10° of a grazing-incidence knife-edge configuration. The blocks adjust the slit gap by being translated along guides by two actuating bars, respectively. Water flowing through holes, drilled along the actuating bars, cools the heat-load of both blocks. The vertical slit has the same structure as the horizontal slit except its installation direction with respect to the vacuum chamber and its grazing incidence angle. By virtue of a pair of blocks translating on guides, no alignment between both blocks is required and the installed slits show stable operating performance. The cooling performance of the two slits has been also shown to be acceptable. In this paper, the detailed explanation for the design of the two slits is presented and their operating performance is discussed.

Keywords : Multi-pole wiggler, High heat-load, Slit, Grazing-incidence knife-edge configuration

* [E-mail] khgil@postech.ac.kr