

월성부지의 환경조건을 고려한 CANDU 사용후연료
조밀건식저장시스템의 열전달 해석

Heat Transfer Analysis of Consolidated Dry Storage System for
CANDU Spent Fuel Considering Environmental Conditions of Wolsong site

이경호, 윤정현, 최병일, 이홍영
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 CANDU 사용후연료 조밀 건식저장시스템인 MACSTOR/KN-400 모듈의 최대온도 및 온도구배를 예측하기 위해 열전달해석을 수행하였다. MACSTOR/KN-400은 기존의 캐나다 Gentilly-2 원전에서 운전중인 MACSTOR-200 보다 2배의 열을 방출하고 있다. 이에 MACSTOR/KN-400 모듈의 온도와 온도구배를 감소하기 위해 모듈벽면과 상부슬래브에 열차단판을 설치하였다. 열전달해석에서는 월성지역의 일사량, 일교차, 계절별 대기온도 및 핫바스켓 등을 고려하였다.

해석은 비정상조건인 여름 및 겨울철 조건에서 수행하였으며, 대기온도 40℃에서 콘크리트 모듈의 최대 국부온도는 63℃로 나타났다. 콘크리트 벽면과 상부슬래브의 온도구배는 안전여유도 3℃를 고려하여 28℃, 25℃를 각각 나타내었다. 온도분포 결과는 ACI 349 코드에서 규정한 온도제한치를 만족하여 MACSTOR/KN-400 모듈은 열적으로 안전한 것으로 입증되었다.

Abstract

The purpose of the present paper is to perform heat transfer analysis of the MACSTOR/KN-400 dry storage system for CANDU spent fuel in order to predict maximum concrete temperatures and temperature gradients. This module has twice the capacity of the existing MACSTOR-200, which is in operation at Gentilly-2.

In the thermal design of the MACSTOR/KN-400, Thermal Insulation Panels(TIP) were introduced to reduce concrete temperatures and temperature gradients in the module caused by the high fuel heat loads. Environmental factors such as solar heat, daily temperature variations and ambient temperatures in summer and winter at Wolsong site and the assumed presence of hot baskets were taken into consideration

in the simulations.

Two cases were performed for the MACSTOR/KN-400: Off-normal cases in summer and winter. The maximum local concrete temperatures were predicted to be 63°C for the off-normal case. The temperature gradients in the concrete walls and roof are predicted to be 28C and 25C for off-normal operation in summer, incorporating a 3C uncertainty.

In conclusion, this paper shows that the maximum temperature for the module is expected to meet the temperature limitations of ACI 349.

1. 서 론

사용후연료 건식저장시스템은 자연대류에 의해 저장된 연료의 붕괴열을 제거하고 있다. CANDU 사용후연료 조밀건식저장시스템인 MACSTOR/KN-400(이하 M/KN-400)은 현재 캐나다 Hydro Quebec사에서 운영중인 MACSTOR-200(이하 M-200) 보다 저장용량이 2배로 증가되었다.

저장된 연료에서 발생하는 붕괴열은 모듈에 열응력을 발생시킬 뿐 아니라, 구조물의 안전성에도 영향을 미치기 때문에 열전달 해석을 통한 열적 안전성 입증에 필요하다.

M/KN-400은 증가된 붕괴열에 대해 열적안전성을 확보시키기 위해 모듈벽면과 상부슬래브에 열차단판(Thermal Insulation Panel)을 설치하였다. 열차단판의 역할은 저장실린더에서 복사된 열이 모듈벽면으로 전달되는 것을 차단하여 모듈의 온도와 온도구배를 감소시킨다. 또한 열차단판의 외부 및 내부재료는 스테인레스와 단열재로 각각 설계되었다.

M/KN-400에 저장되는 설계기준 사용후연료는 평균연소도가 7,800MWD/MTU이고 냉각기간이 6년인 사용후연료이다. 열해석시 평균연소도인 경우 열방출율은 6.08W이며, 고연소도 연료인 경우에는 열방출율이 9.06W이다.

건식저장시설의 열방출율에 영향을 미치는 인자로는 일사량, 대기온도, 일교차와 같은 환경조건이다. 이러한 데이터는 월성 환경조건에서 측정되었으며, 해석에서는 시간에 따라 환경변수의 값이 변화하는 것으로 가정하였다.

본 해석에서는 모듈의 한쪽 사이드에서 공기입구가 20% 막힌 비정상조건의 여름과 겨울철 조건에서 수행하였다. M/KN-400의 기술기준으로 적용되는 ACI 349는 단지 정상 및 사고조건만 언급하고 있기 때문에 비정상조건을 적용할 경우 정상조건에 대해 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

ACI 349 코드에서는 정상운전조건에서 평균콘크리트 허용온도는 66°C 미만이어야 하며, 국부적인 부위에서의 콘크리트 허용온도는 93°C 미만으로 규정하고 있다. 따라서 열해석을 통해 계산된 M/KN-400 모듈의 온도분포가 ACI 349 코드의 요구조건을 만족하는지 입증하고자 한다.

2. M/KN-400 모듈 개요

M/KN-400 모듈은 그림 1에서 나타낸 바와 같이 40개의 저장실린더를 저장할 수 있으며, 한 개의 저장실린더에는 CANDU 사용후연료 60다발을 넣은 바스켓을 10단으로 저장할 수 있다. 실린더 배열은 4열의 10줄로서 캐나다 AECL에서 기(既) 개발한 M-200보다 2열이 증가된 형태이다. M/KN-400모듈의 형태는 M-200모듈과 같은 형태이며, 사용후연료에서 발생하는 붕괴열을 제거하는 주요 방식은 자연대류로 설계되었다. 그림 2에서 공기유로의 구성은 외부 공기가 들어오는 모듈하단부에 공기입구, 저장실린더 주변의 내부볼트, 가열된 공기를 외부로 배출시키는 공기 출구로 구성되어 있으며, 그 공기유로 형태는 직접적인 방사선 피폭을 줄이기 위하여 미로형태를 가지고 있다. 입구로 들어온 공기는 저장실린더 주변에서 가열되고, 찬 공기와 뜨거운 공기사이의 밀도차이를 발생시키게 된다. 밀도차이에 의한 공기의 부력으로 붕괴열은 외부로 전달되고, 나머지 붕괴열은 콘크리트 모듈과 저장실린더에서 전도와 복사에 의해 제거된다.

3. 열전달 고려인자

3.1 열방출율

3.1.1 연료바스켓의 열출력

평균바스켓의 경우 60개의 연료봉이 평균연소도 연료이기 때문에 3,648W의 출력을 나타내고 있다. 그러나 M/KN-400의 경우 핫바스켓 개념을 도입하였다. 실제 월성원전에서 연료를 임의적으로 장전할 경우 연료바스켓 내부에 몇 개의 고연소도 연료다발이 존재할 가능성이 있다. 최대 열하중에 도달하는 연료다발의 형상은 6개의 고연소도 연료다발이 1개의 고연소도 연료다발을 둘러싸는 클러스터(cluster)이다. 이러한 형상은 연료다발의 온도와 연료다발에서 복사된 열량을 최대화 시킨다. 핫바스켓에 대한 개념을 그림 5에 나타내었다. 핫 바스켓은 9.76W를 방출하는 7개의 고연소도 연료다발과 6.08W를 방출하는 평균연소도 연료다발 53개로 구성되었기 때문에 총 방출열량은 3,906W이다.

3.1.2 저장모듈의 열출력

모듈에는 400개의 연료바스켓이 저장되기 때문에 평균연소도 연료다발이 저장될 경우 모듈이 1%의 확률로 도달할 수 있는 최대 열출력은 146.5kW이다.

3.2 환경인자

열해석시 사용한 입력자료는 월성지역의 기상자료를 토대로 하여 보수적으로 열해석을 수행하였으며, 표 1에는 열해석에서 사용한 설계변수를 나타내었다. 또한 아래에는 각 환경인자에 대해 간략히 설명하였다.

3.2.1 대기온도

대기온도는 M/KN-400모듈의 열전달 성능에 영향을 미치는 주요 인자이다. 해석에서는 설계요건에서[1] 정의된 월성지역의 여름철 최대 대기온도(40℃) 및 겨울철 최저 대기온도(-13.1℃)를 적용하였다. 실제 사용후연료 건식저장시설의 운영으로부터 콘크리트의 수축 및 팽창효과 때문에 겨울철의 응력이 여름철 보다 클 것으로 예측되어 겨울철

최저 대기온도 조건도 해석에 고려하였다.

3.2.2 일교차

일교차 온도를 10℃로 가정하였다. 이 값은 월성환경조건에서 보수적으로 가정된 것으로 여름과 겨울철 열해석 조건에 대해 균일하게 적용하였다. 일교차는 주간에는 선형적으로 증가하고, 야간에는 감소하는 것으로 가정하였다. 따라서 대기온도는 평균 35℃를 기준으로 낮과 야간에 각각 40℃, 30℃에 도달하는 것으로 모델링 하였다. 겨울철 해석조건은 평균 -8.1℃를 기준으로 주간과 야간에 각각 -3.1℃, -13.1℃에 이르는 것으로 모델링 하였다. 모든 열해석에서 냉각공기의 유동은 구조물을 통해 공기의 자연대류에 의해서만 생성되는 것으로 보수적인 가정을 하였다. 일반적으로 공기에 직접적으로 노출되는 콘크리트 외곽부분은 일교차 변화와 일사량에 따라 가열 또는 냉각되어 진다. 콘크리트 구조물의 내부표면은 일중 온도의 변화가 작으며, 외부 콘크리트 표면보다는 일교차에 영향을 적게 받는다. 저장실린더는 열용량이 매우 크기 때문에 일중 표면온도가 매우 느리게 변화하고 있다. 콘크리트의 내부표면과 열차단판은 상대적으로 균일한 온도를 유지하는 열소스로부터 복사해 의해 가열되기 때문에 외부 콘크리트 온도보다 안정된 온도를 유지할 수 있다. 따라서 일교차는 일중 콘크리트 내부에서 온도구배의 변화를 발생시키고 있다.

3.2.3 일사량

M/KN-400저장모듈은 옥외에 건설되기 때문에 태양으로부터 열하중의 영향을 받는다. 일사량의 영향은 콘크리트 외부 표면온도를 약간 증가시키나, 콘크리트를 통한 전도 열전달을 감소시킨다. 콘크리트 캐니스터와는 달리 M/KN-400의 경우 90% 이상의 열이 공기유로를 통해 자연대류에 의해 제거되기 때문에 일사량은 저장실린더에서 외부로의 열전달에는 거의 영향을 미치지 않고 있다. 일사량은 주로 콘크리트를 통한 열전달 즉 전도 열전달에 영향을 미치고 있다. 페인팅은 일사에 대해 콘크리트 표면의 흡수율 (absorptivity)을 줄이고 방사율(emissivity)을 증가시키기는 역할을 한다. 그러나 M/KN-400모듈의 외부 페인팅은 열적 성능에 거의 영향이 없는 것으로 판단이 된다. 일사량은 여름철에 최대가 되며, 겨울철에 상당히 감소하게 된다. 모듈의 수평 및 수직면에 대한 일사량이 사용되었으며, 일사량을 cosine 함수형태로 일중 변화하는 것으로 모델링 하였다. 콘크리트 내부온도가 하루 중 거의 일정하게 유지되기 때문에 콘크리트 외부표면 온도가 증가하면 콘크리트 사이의 온도구배는 감소하게 된다. 일반적으로, 일사량은 열하중을 증가시키는 부정적인 인자로 생각되지만 콘크리트의 온도구배(Thermal Gradient)를 감소시키는 긍정적인 효과도 동시에 가지고 있다. 야간에 콘크리트 표면온도가 냉각되기 때문에 외부 콘크리트 온도가 가장 차가운 아침 시간에 콘크리트의 온도구배가 가장 클 것으로 예측이 된다. 겨울철에는 일사량이 감소하게 된다. 구조물의 열응력이 겨울조건에서 가장 크다는 것을 입증하고자 해석에는 실제값 보다 작은 겨울 일사량을 적용하였다. 월성지역의 여름 및 겨울철 일사량과 해석에 사용된 값을 표 1에 나타내었다.

3.3 기타 설계인자

3.3.1 지반과 모듈사이의 열전달

여름철에는 모듈에서 발생한 적은 양의 열이 모듈바닥으로 전달되어 지반으로 방출된다. 겨울에는 공기가 지층온도보다 낮기 때문에 열은 따뜻한 지반으로부터 차가운 모듈의 바닥으로 전달된다. 모듈과 지반사이의 미소한 열전달 효과를 열해석에 고려하였다. 미소한 열전달은 구조해석에서 고려될 작은 양의 온도구배를 발생시키고 있다.

3.3.2 감마 열축적

사용후연료에서 방출된 방사선(중성자, 알파, 베타, 감마)은 내부열을 발생시키면서 거의 대다수가 연료바스켓 내부에 흡수된다. 일부 감마 방사선은 연료바스켓과 저장실린더를 관통하여 주변의 콘크리트 차폐체에 흡수되고 있다. 감마방사선은 열차단판의 콘크리트 쪽에 거의 축적(감마레이는 판넬의 얇은 재료를 쉽게 통과함)되며, 콘크리트 차폐 두께의 10 ~ 20cm내에 거의 흡수된다. 직접적으로 콘크리트에 축적되는 열량은 $2.52\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 미만이며, 이러한 미소 열축적은 내부 콘크리트 표면 전체에 균일하게 축적되는 것으로 가정하였다. 감마레이에 의해 전달된 열은 저장실린더로 나오는 총 열량에서 빼지 않고 별도의 열량으로 계산하였기 때문에 보수적인 가정이라 할 수 있다. 감마방사선에 의한 열축적의 영향은 내부 콘크리트 표면온도와 온도구배를 약간 증가시킨다. 따라서 감마레이에 의한 열축적을 열해석에 포함하였다.

3.3.3 열차단판(Thermal Insulation Panel)

M/KN-400모듈 내부표면에 열차단판(TIP)이 설치되었다. 열차단판은 열응력을 직접적으로 감소시킴과 동시에 구조물 전체의 응력을 감소시킨다. 열제거 측면에서는 저장실린더에서 복사된 열이 콘크리트로 들어가는 것을 제한할 뿐만 아니라 모듈 상층부에서 뜨거운 공기로부터 열이 콘크리트로 들어가는 것을 제한한다. 열차단판의 외부표면은 스테인레스(SUS 304)의 보호막으로 되어있으며, 내부는 열을 차단하는 단열재로 구성되어 있다. 모듈의 설계수명동안 예측되는 방사선량을 고려하여 열차단 재료를 선택하였다. 열차단판에 대한 개념적인 설계형상은 그림 2,6,7과 같으며, 벽면에서의 열차단판 설치영역은 모듈상부로부터 3.5m이다. 열차단판 표면에서의 열전도율이 $0.05\text{W/m}^\circ\text{C}$ 이하로 유지되도록 열차단판 두께를 설계하였다. 표면의 스테인레스의 두께는 2mm 이며, 내부의 단열재 두께는 40~50mm로 설계하였다. 열차단판은 콘크리트에 안전하게 부착되도록 볼트를 설치하며, 지진이 발생하는 동안에도 안전하게 위치를 유지하도록 설계되어야 한다.

4. 열전달 해석

4.1 해석코드

본 논문에서 사용한 코드는 캐나다 AECL에서 개발한 열해석 평가코드인 CATHENA 전산코드이다. 이는 1차원 유체유동 및 고체에서 2차원 열전달 해석을 수행한다. CATHENA는 대류, 전도 및 열복사에 의한 열전달을 모델링 하여, 질량, 운동, 에너지에 대한 보존의 식을 계산하여 해석을 수행한다. 적용사례로는 국내 월성원전 2, 3, 4

호기, 캐나다 AECL Chalk River의 MAPLE 원자로 및 중국 Qinshan 원자로에 대한 열적 안전성 평가를 수행하여 인허가를 받은 실적이 있다.

4.2 M/KN-400모듈의 열해석 모델

M/KN-400에 대한 열해석 모델을 그림 3,4에 나타내었다. 모듈내에 있는 40개 저장실린더 가운데 16개의 저장실린더를 해석모델로 선택하였다. 공기회로, 모듈벽면, 상부슬래브 및 저장실린더는 M-200과 동일하게 모델링 하였다. 열전달 메커니즘도 또한 M-200과 동일하게 모델링 하였다. 그러나 감마선에 의해 복사된 열이 콘크리트 모듈에 축적되는 것으로 모델링 하였다. 또한 비정상 열전달 조건을 고려하기 위해 계절별 일사량과 대기온도의 일교차를 적용하였다.

5. 해석결과 및 고찰

5.1 여름철의 해석 결과

그림 8은 상부슬래브, 벽면, 하부슬래브에서의 하루 동안의 온도구배 변화를 보여주고 있다. 일사가 모듈의 외부표면을 가열하는 동안 상부슬래브와 벽면의 온도구배가 감소하고 있다. 여름철 일사량이 최대인 기간동안에는 상부슬래브의 외부온도가 일시적으로 더 높아지는 경우가 발생하게 된다. 하부슬래브에서의 온도구배는 하루 동안 거의 일정하게 유지되고 있다. 최대일사량은 비정상 시작후 6시간 뒤에 도달하였으며, 이때 온도구배는 최소이며 일사량이 감소할수록 온도구배가 증가하여 일일 중 마지막에 온도구배가 최대로 된다. 이때 최대온도구배는 상부슬래브와 벽면에서 28℃, 25℃를 각각 나타내었다.

저장실린더와 상부슬래브에서의 일중 온도변화는 그림 9에 나타내었다. 상부슬래브 내부온도의 변화는 거의 없지만, 외부온도는 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 일시적인 기간동안 외부온도가 내부온도 보다 높게 되는 경우가 있으며 이는 일사량이 최대인 시점에서 발생한 것으로 판단이 된다. 또한 콘크리트의 최대국부온도는 63℃로 나타났다..

5.2 겨울철의 해석 결과

겨울철에 대한 비정상 조건의 해석결과는 그림 10에 나타내었다. 최대 온도구배 상부슬래브와 벽면에서 26℃, 23℃를 나타내었다. 또한 전반적인 결과는 여름철과 비슷하나 주요 차이점은 다음과 같다.

최대온도구배는 여름철보다 낮게 계산되었는데 대기온도가 낮음에 따라 공기의 밀도가 증가하여 냉각 성능이 개선되었기 때문이다. 상부슬래브에서의 온도구배의 변화는 여름철보다도 작았다. 이는 겨울철에 평균 일사량이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 최대 콘크리트 및 실린더 표면의 온도는 여름철 보다 상당히 낮았다. 바닥 슬래브에서의 온도구배는 여름철보다 높으며, 여름철과는 정반대의 온도구배 분포를 보여주고 있다.

6. 결론 및 향후계획

M/KN-400 모듈에 대해서는 2가지에 대해 모델링 하였다. 1) 40℃ 최대 대기온도에서의 비정상운전조건, 2) -13.1℃ 최저 대기온도에서의 비정상운전조건, 3) 40℃ 최대 대기온도에서의 공기입구 막힘조건, 4) -13℃ 최저 대기온도에서의 공기입구 막힘조건. 비정상운전조건(한쪽 면에 있는 공기입구가 20% 막힘)의 온도분포는 정상운전조건을 충분히 만족하였음.

여름철 M/KN-400 비정상운전에서 콘크리트 상부슬래브와 벽면의 온도구배는 각각 25℃, 28℃ 이다. 겨울철 비정상 운전조건에서 콘크리트 벽과 상부슬래브에서의 온도구배는 여름철 보다 낮은 것으로 예측이 되었다. 이는 겨울철의 일사량이 여름보다 낮기 때문인 것으로 판단이 된다. 구조해석 에서는 콘크리트의 수축 및 팽창의 효과를 추가적으로 고려해야 할 것으로 판단이 된다.

또한 최대 국부온도는 여름철 조건(대기온도 40℃)에서 63℃로 예측되었다. 장기간 동안에 월성부지에서 측정된 최대 평균온도가 25.7℃임을 고려하면 정상조건에서 최대콘크리트 내부 표면온도는 63℃에서 49℃로 14℃ 정도 감소하였다. 따라서, 기술요건인 ACI 349 및 CSA 287.3의 허용온도 조건을 충분히 만족하기 때문에 M/KN-400 모듈은 열적으로 안전함을 알 수 있다.

7. 참고문헌

- [1] Y.H.YOON, "MACSTOR/KN-400 Design Requirements", 2004. February.

표 1. M/KN-400 저장모듈 설계변수

	실제 월성부지조건	비정상 해석조건
대기온도	-13.1 ~ 34℃	-13.1 ~ 40℃
대기 일교차	±9.8℃(봄), ±9.2℃(겨울)	± 10℃, (여름, 겨울)
바람	바람 존재	바람효과 무시*
심지층온도	15.2℃	15.2℃
수평일사량(여름철)	707W/m ² peak	707W/m ² peak
수직일사량(여름철)	452W/m ² peak	452W/m ² peak
일사량(겨울철)	여름철 일사량의 60%	여름철 일사량의 30%
연료 장전변수		16개의 저장실린더 더중 중양의 4개 실린더 상부 3단에 핫바스켓 적용
모듈 운영변수	모든 공기유로 개방	1개의 공기입구차단
* 바람이 존재시 모듈의 냉각효과를 증대시키고, 온도를 낮추게 한다.		

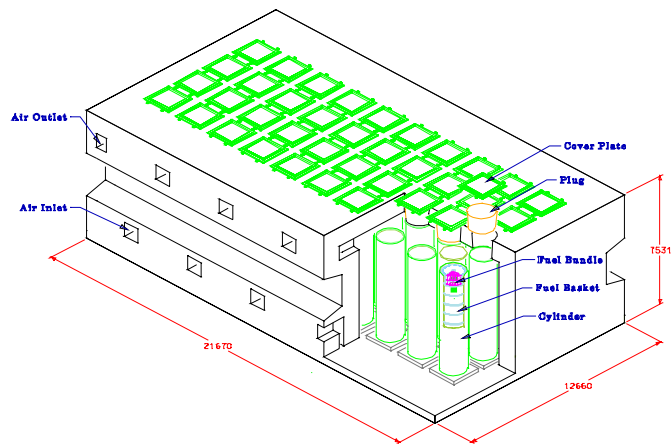


그림 1. M/KN-400모듈의 형상 및 크기

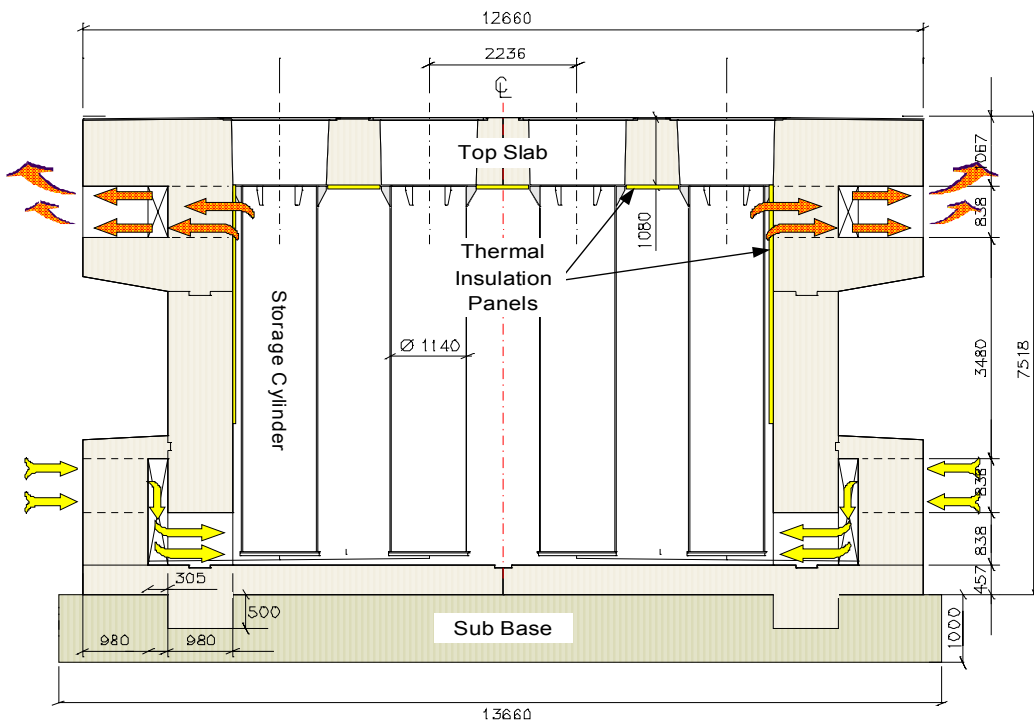


그림 2. M/KN-400 모듈의 형상 및 공기유로

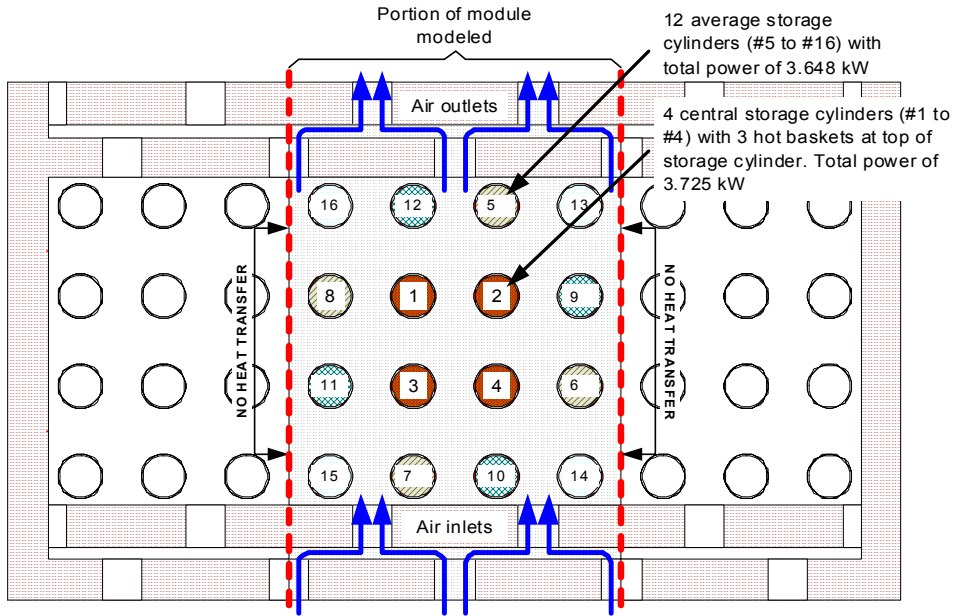


그림 3. 열해석에서 모델링한 16개의 저장실린더 위치를 나타내는 모듈평면도

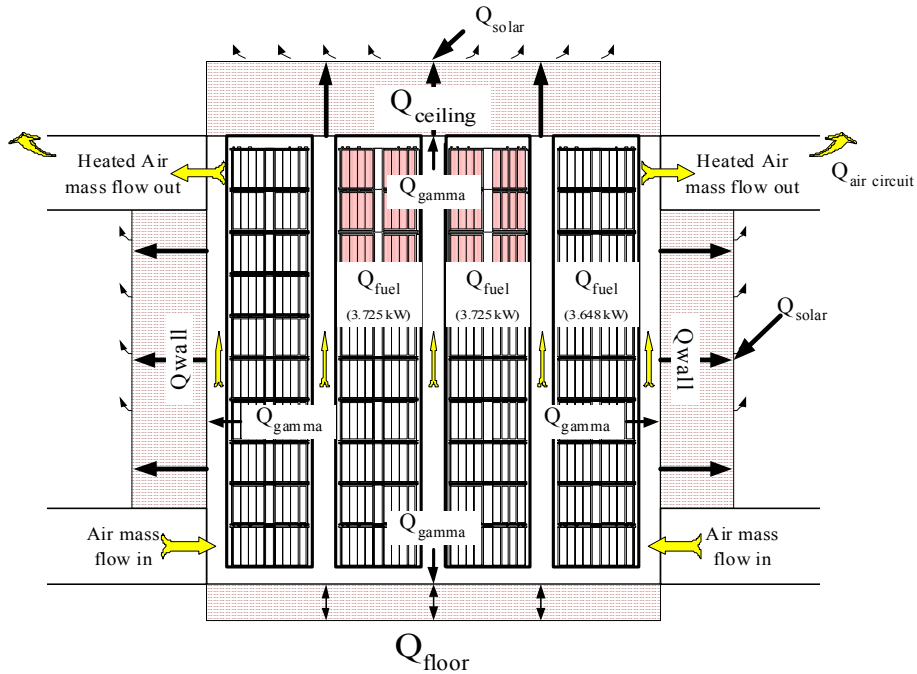


그림 4. M/KN-400 모듈에 사용된 열해석 모델 개략도

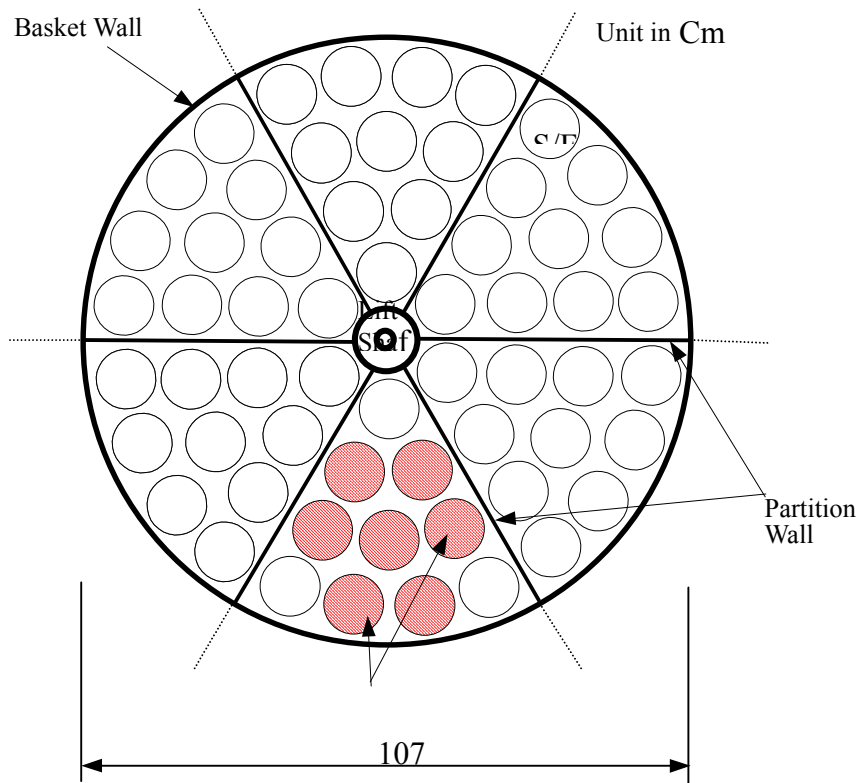


그림 5. M/KN-400 모듈의 핫바스켓 개념도

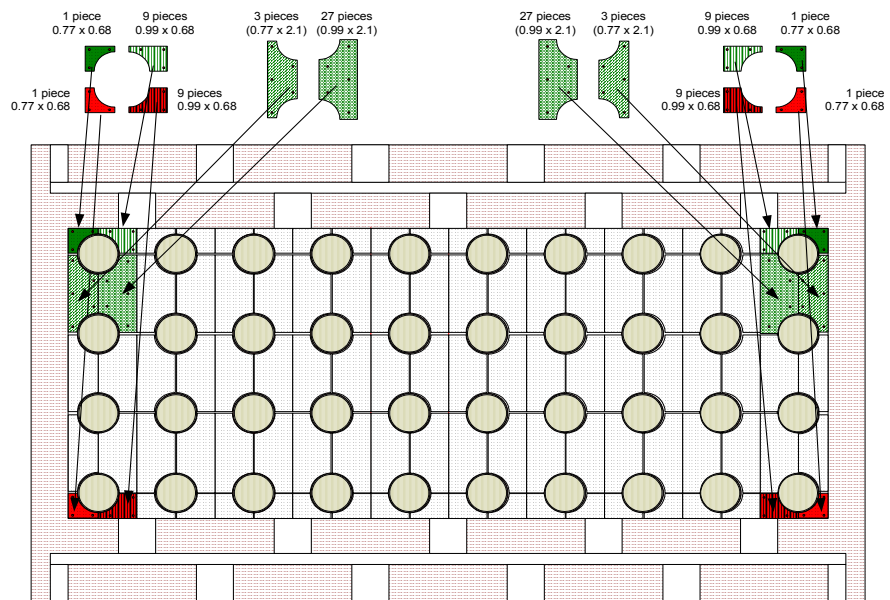


그림 6. M/KN-400 모듈 상부슬래브에서의 열차단판 형상

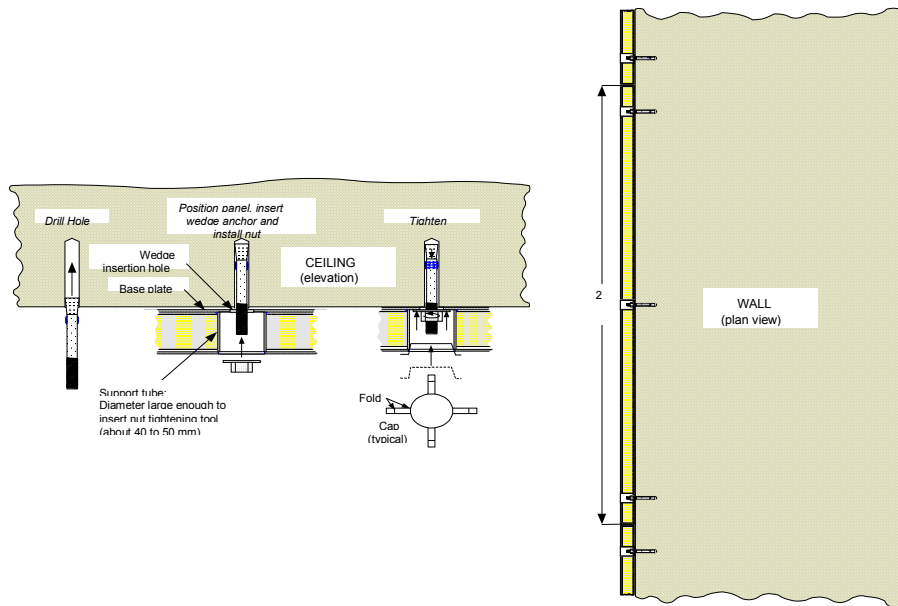
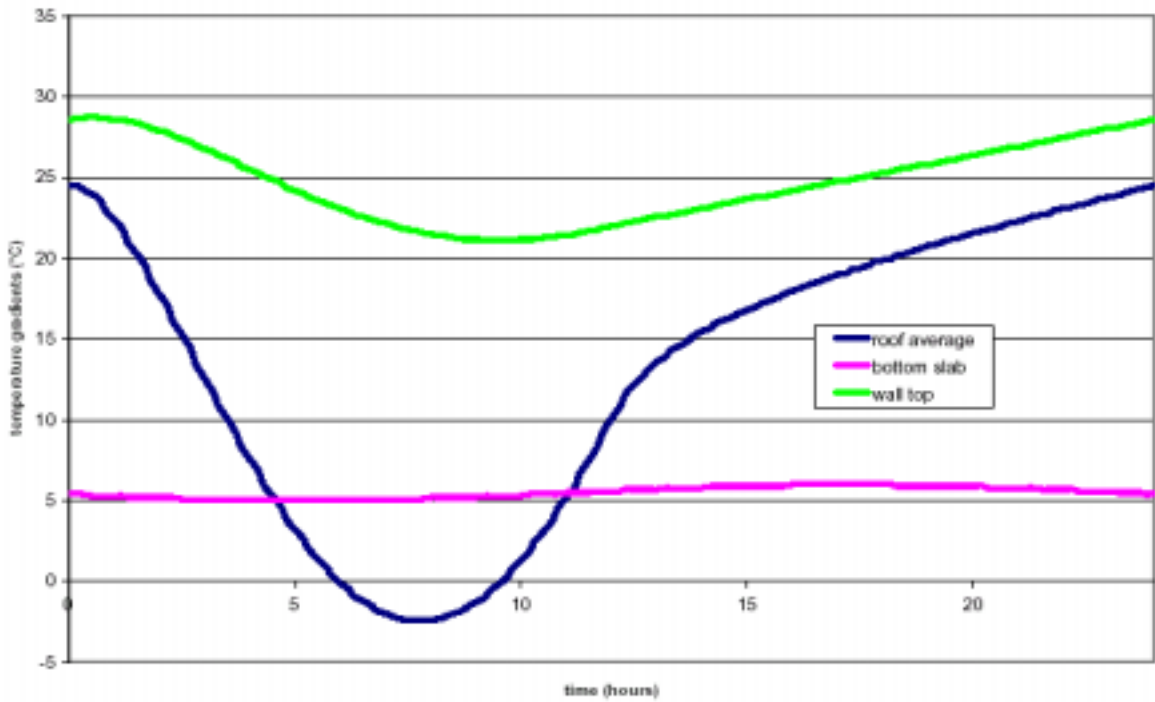
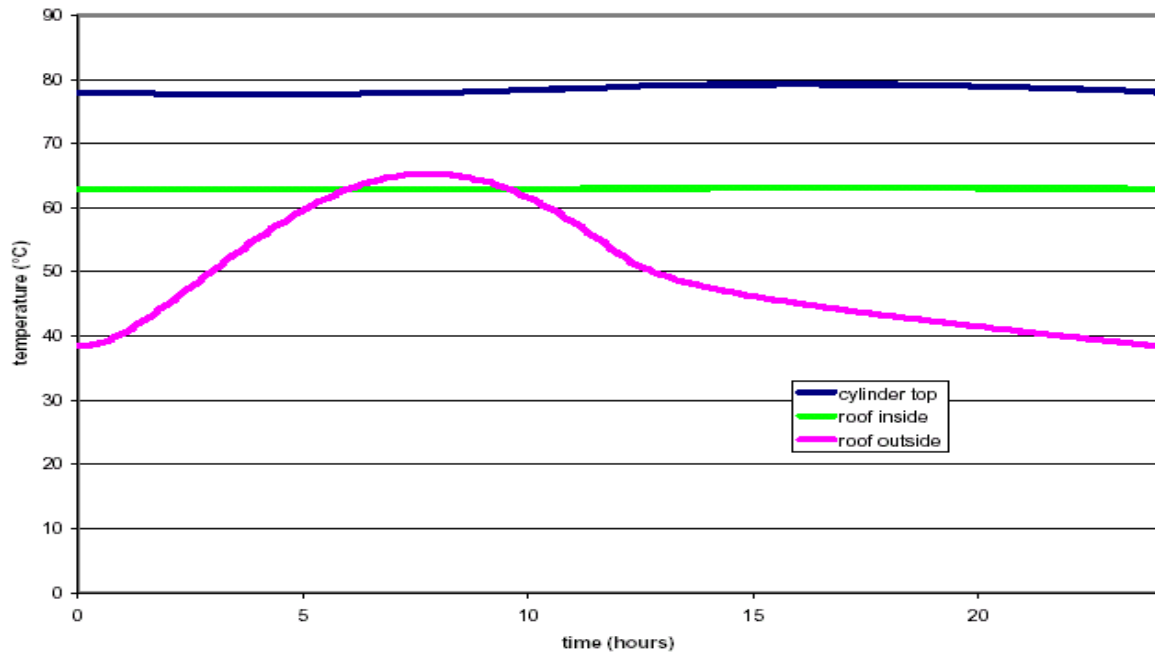


그림 7. 열차단판의 측면도 및 세부 형상도면



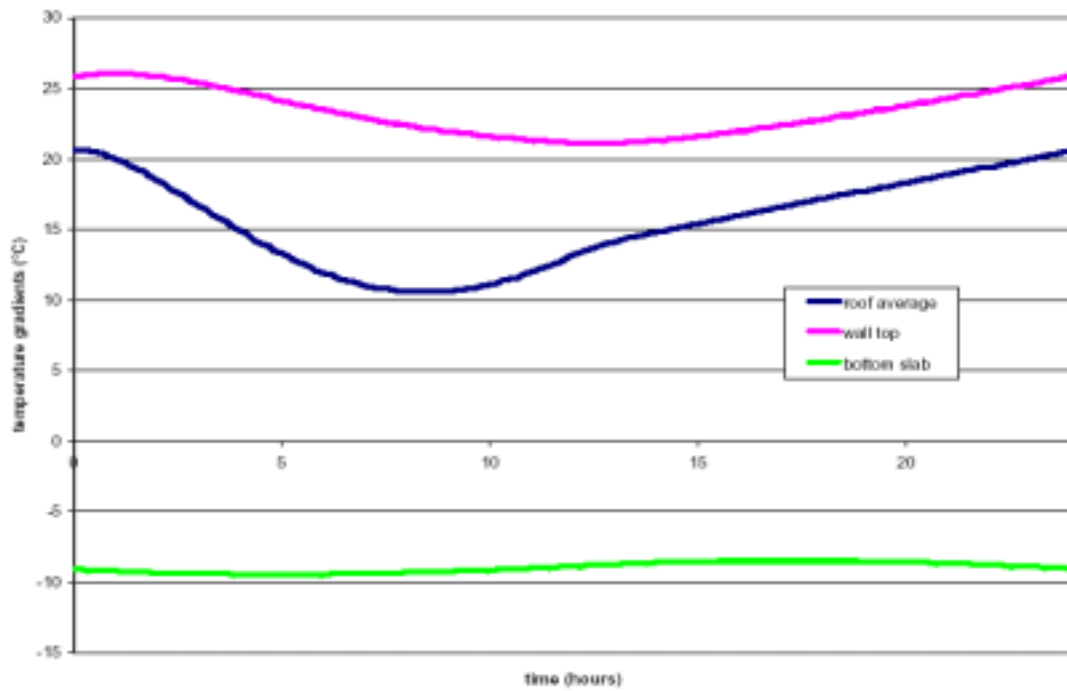
Time 0 corresponds to 6 am.

그림 8. 비정상 운전조건에서 MACSTOR/KN-400 온도구배 변화



Time 0 corresponds to 6 am.

그림 9. 여름철 비정상 운전조건에서 일중(日中) 실린더 및 상부슬래브의 온도변화



Time 0 corresponds to 6 am.

그림 10. 겨울철 비정상운전조건에서의 일중(日中) 온도구배 변화