2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 사용후연료 건식저장시설(MACSTOR/KN-400)의 열전달 해석

Heat Transfer Analysis of the MACSTOR/KN-400 Storage Module for CANDU Spent Fuel

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

요 약

CANDU 사용후연료 조밀 건식저장시스템인 MACSTOR/KN-400의 열전달 해석을 통해 콘크리트 모듈의 열적안전성을 입증하였다. 이를 위해 캐나다 Gentilly-2 원전의 MACSTOR-200 실측온도와 CATHENA 전산코드에 의한 해석결과를 비교·검증한 결과 이론값과 실측값이 매우 일치하여 CATHENA 전산코드의 적합성을 확인하였다. 검증과정에서 계산된 모듈의 K계수와 대류열전달계수를 MACSTOR/KN-400의 열해석 모델링에 입력하여 계산하였다. 대기온도 40℃의 정상조건에서 콘크리트 모듈의 최대 평균온도와 국부온도는 각각 53℃, 69℃로 나타났으며, 이는 ACI 349 코드의 허용온도 요건을 충분히 만족하였다.

Abstract

It was verified through heat transfer analysis that a consolidated dry storage system for CANDU spent fuel, MACSTOR/KN-400 was safe in thermal aspect. In order to validate the computer code of CATHENA which was employed to perform the analysis, the comparison between actual measurement data of MACSTOR-200 at Getilly-2 NPP in Canada and computed values from the code has been carried out. The comparison represented that the computed values acceptably agreed to the measurement data and thus the computer code was verified for its application to MACSTOR/KN-400. The identical K-values(parameter to describe head loss inside the module) and convective heat transfer coefficient of the module obtained by the validation was applied to the heat transfer analysis modelling of MACSTOR/KN-400. The result from the analysis showed that under 40℃ of ambient temperature, maximum average and local temperatures of the concrete module were represented by 53℃ and 69℃, respectively, which fulfilled well the allowable temperature limit of the concrete structure given by ACI349(American Concrete Institute).

1. 서 론

한수원(주)는 4개 호기의 CANDU 원자로를 운전하고 있으며, 매년 21,000다발의 사용후연료를 발생시키고 있다. 2006년 이후에는 CANDU 사용후연료 누적발생량이 저장용량을 초과할 것으로 예상이 되며, 원전운영에 차질을 초래할 우려가 있어 이에 대한 대비책으로 부지이용 효율이 높은 고밀도 저장시스템이 필요하게 되었다. 기존의 건식저장시설인 콘크리트 사일로는 부지의 이용효율이 낮아 원자로의 설계수명 까지 사용후연료를 저장하기에는 부지의 제한이 있어며, 캐나다 AECL에서 개발한 MACSTOR-200(이하 M-200) 모듈은 저장밀도를 개선하였으나 국내 여건을 고려하였을 때 부지이용 효율이 만족스럽지 못한 실정이다. 따라서 저장용량이 2배로 증가된 MACSTOR/KN-400(이하 M/KN-400 모듈)을 AECL사와 공동으로 개발하고 있다.

M/KN-400은 전도로 붕괴열을 제거하는 콘크리트 사일로와 달리 자연대류로 붕괴열을 제거하므로 작은 부지면적에 고밀도의 사용후연료를 저장함에도 불구하고 콘크리트 사일로 보다 낮은 핵연료 온도를 유지 할 수 있어서 설비의 안전성, 경제성, 부지의 이용성 측면에서 우수하기 때문에 새로운 개념의 CANDU 사용후연료 건식저장시설로 고려되고 있다.

본 논문에서는 설비의 안전성 입증에 기초가 되는 M/KN-400모듈의 열전달 해석을 수행하기 위해, Gentilly-2 발전소의 M-200에서 실측한 온도결과로부터 유도된 실험식과 CATHENA 전산코드에 의한 열해석 결과와 비교를 통해 적용한 코드의 적합성을 입증하였다. M-200모듈의 열해석 과정에서 도출된 대류열전달계수와 K계수를 M/KN-400의 해석 모델링에 입력하여 대기온도 40℃의 정상운전조건에 대해 열해석을 수행하였다. M/KN-400모듈의 열적요건인 미국 콘크리트 학회의 ACI 349 코드에서는 정상운전조건에서 평균콘크리트 온도는 66℃ 미만이어야 하며, 국부적인 부위에서의 콘크리트 허용온도는 93℃ 미만으로 규정하고 있다. 따라서 열해석을 통해 계산된 M/KN-400 모듈의 온도분포가 ACI 349 코드의 요구조건을 만족하는지 입증하였다.

2. M/KN-400 저장모듈

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(旣) 개발한 M-200보다 2열이 증가된 형태이다. M/KN-400모듈의 형태는 M-200모듈과 같은 형태이며, 사용후연료에서 발생되는 붕괴열을 제거하는 주요 방식은 자연대류로 설계되었다. 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. 밀

도차이에 의한 공기의 부력으로 붕괴열은 외부로 전달되고, 나머지 붕괴열은 콘크리트 모듈과 저장실린더에서 전도와 복사에 의해 제거된다.

3. 열전달 해석

3.1 M-200모듈의 온도측정 및 열해석 모델링

캐나다 Gentilly-2 발전소에서 M-200 모듈에 대해 1,848W, 2,520W, 2,652W, 2,916W와 같은 4개의 열출력을 가진 실린더에 대해 상부슬라브와 벽체에 대해 온도를 실측하였다. 온도 실측치로부터 온도와 열출력 사이의 실험식은 아래와 같이 유도되었다[1].

- 저장 실린더와 모듈로부터 나가는 공기와의 온도차(T_c-T_a)

$$T_c - T_a = 0.29\,(Q/A)^{0.731} \quad (1)$$

- 모듈 입구공기와 출구공기와의 온도차(T_a-T_{amb}):

$$T_a - T_{amb} = 0.752\,Q^{0.7} \quad (2)$$

- 모듈 중간높이에서 콘크리트 내벽과 외벽의 온도차(dT_{wall}) :

$$dT_{wall} = 0.416\,Q^{0.797} \quad (3)$$

- 콘크리트 상부 슬라브 내부와 외부의 온도차(dT_{roof}) :

$$dT_{roof} = 0.448\,Q^{0.823} \quad (4)$$

이 실험식을 출력이 6.08W(6년 냉각)인 다발을 장전한 저장실린더(출력 3648W)에 적용하였다. 따라서 20개의 실린더를 저장하는 M-200모듈에서의 전 출력은 73kW이다. 이러한 조건을 가진 M-200 모듈에 대해 CATHENA 전산코드로 열해석을 수행하였으며 계산결과와 실험치를 비교 검증하였다.

4개의 실린더로 구성되는 M-200모듈의 열해석 모델은 콘크리트 모듈을 통하는 공기 입출구를 묘사하고 있으며, 공기유로는 지면에서 0.5m 위쪽에 콘크리트 벽을 통과하는 지름 15㎝의 입구와 M-200모듈의 내부 바닥까지 하향하는 15cm파이프로 구성되어 있다. 출구는 M-200모듈의 내부 상부에서 콘크리트 벽을 통하여 수평으로 연결하는 15cm배관으로 되어있다. 저장실린더에서 발생하는 복사열을 고려하기 위해 저장실린더와 콘크리트 벽과 상부슬라브 간의 복사 열전달을 CATHENA 코드에서 View Factor를 도입하여 모델링 하였다. 복사에 의해 콘크리트 벽과 상부슬라브로 전달된 열은 일부는 대기공기에 의해 대류로 외부에 전달되고 나머지는 콘크리트 벽과 상부슬라브를 통해 전도에 의하여 제거된다.

3.2 M/KN-400모듈의 열해석 모델

그림 2에는 M/KN-400모듈의 열해석 모델을 나타내었다. 4 x 4 배열의 16개의 실린더로 구성된 단위 모듈 형태로 모델링을 하였다. 이 모델링은 M-200모듈과 동일한 공기 입출구를 가지고 있을 뿐만 아니라 콘크리트 벽 및 상부슬라브의 두께도 거의 동일한 값

을 가지고 있다. 또한, 16개의 저장실린더와 콘크리트 벽과 상부슬라브 사이의 열복사를 모델링 하기 위해 실린더간 및 실린더와 벽체간의 View factor를 계산하였으며, 저장실린더로부터 복사에 의해 콘크리트 벽 및 상부슬라브에 전달된 열은 일부는 대기공기에 의해 대류로 전달되고 나머지는 콘크리트 벽과 상부슬라브를 통하여 전도에 의하여 제거된다. 바닥은 단열조건으로 가정함으로써, 벽 및 상부슬라브의 온도차를 보수적으로 해석하였다. 모듈벽은 반경 및 수직방향으로 각각 10개의 노드로 구분하였고, 실제 모듈벽의 중간부분 두께는 입구쪽 보다 작으나, 보수적인 해석을 위해 공기입출구 쪽과 동일한 두께로 설정하였다. 상부슬라브는 벽의 수직방향으로 10개의 노드로 분할하여 온도분포를 해석하였다.

3.3 열해석 보수성

열해석에서는 보수성을 고려하여 다음과 같은 가정을 하였다.

1) 모듈외부의 바람영향은 고려하지 않았다. 이는 실제 Gentilly-2 원전에서의 온도 실측치 결과, 바람영향은 모듈내에서의 온도를 감소시키고, 모듈 내부와 외부의 온도차를 감소시키는 것으로 나타났다.
2) 열해석의 보수성을 고려하여 바닥 슬라브로의 열전달은 무시하였다. 따라서 전도에 의한 모든 열은 벽체와 상부슬라브를 통해서 빠져나가는 것으로 가정하였다.
3) M/KN-400모듈에서 적용한 대기온도는 40℃로 가정하였다. 이는 월성의 기상관측상 최고 온도가 38℃임을 감안하면 매우 보수적인 온도이다.

4. 해석결과

4.1 M-200을 이용한 검증계산 및 결과

CAHEA코드에 의한 검증계산 과정에서 저장모듈 형상에 의한 압력강하를 나타내는 K계수를 계산하기 위해 Gentilly-2에서 실측한 공기 입출구 온도차(T_a-T_{amb})를 모사하였고, 저장실린더의 조정계수를 통해 실린더와 출구공기와의 온도차(T_c-T_a)를 모사하였다.

해석조건은 실린더당 3,648W의 출력과 M-200이 운영중인 Gentilly-2의 년평균 온도인 5℃ 대기온도 조건에서 수행되었다. 또한, CATHENA 전산코드에 의한 열해석은 Gentilly-2에서 측정된 다른 출력에서도 평가하였으며, 계산결과는 표1, 표2에서 제시한 것처럼 큰 오차 없이 일관성 있게 유지하였다. 계산결과와 실측치 간의 최대 온도차는 0.4℃이다. 이러한 결과를 바탕으로 M/KN-400모듈 각 부분의 온도분포를 해석하는데 신뢰성 있는 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단하였다.

4.2 M/KN-400 해석 결과

M/KN-400은 M-200과 동일한 공기 입·출구관과 대류열전달 조건을 갖추고 있기 때문에, M-200 해석모델에서 실측 온도값과 비교검증 과정에서 계산된 K계수와 대류열전

달계수를 M/KN-400 열해석 모델에 동일하게 적용하여 모사하였다. M/KN-400모듈의 열해석은 다음 두 가지 조건에 대해 CATHENA 전산코드로 열해석를 수행하였다. 첫째 조건은 5℃ 대기온도에서 정상운전조건이고 둘째 조건은 40℃ 대기온도에서 정상운전조건에 대해 열해석을 수행하였다.

CATHENA 전산코드에 의한 해석결과는 표 3에 수록되었다. 5℃ 대기온도 조건에서 M-200모듈과 M/KN-400모듈에서의 온도 계산결과를 비교해 보면, 모듈의 공기회로, 벽 및 상부슬라브에서의 온도차가 M-200모듈보다 크게 나타났다. 이것은 동일한 공기회로에 2배의 붕괴열이 발생한 것으로 판단된다. 공기 입출구간의 온도차 T_a-T_{amb}에 대한 CATHENA 전산코드 해석결과는 열량 Q=146 kW를 식(2)에 적용하여 계산된 온도 24.6℃와 비슷하게 나타났다. 따라서 식(2)를 사용하여 계산한 온도와 CATHENA 전산코드를 사용한 계산 값은 잘 일치함을 알 수 있다.

M/KN-400모듈에서의 벽과 상부슬라브의 온도차를 계산하기 위하여 M-200에서 도출한 실험식인 식(3)과 식(4)를 직접 사용할 수 없다. 그 이유는 이 온도차가 모듈의 출력에 따라 변할 뿐 아니라 형상, 내부공기온도 및 열복사에 의한 열전달에 의하여도 변하기 때문에 CATHENA 전산코드와 같은 열수력 전산코드로 계산을 해야만 하고, 50%의 공기입출구가 차단된 M-200모듈에서의 온도 실측치 보다 다소 높게 나타날 것으로 예상된다. 그 온도차는 M-200 모듈의 입구와 출구가 50% 차단된 경우에 정상조건 보다 30% 정도 증가할 것으로 실증되었으며[2], 모듈 벽과 상부슬라브에서의 온도 실측치는 각각 16.5℃와 19.9℃로 나타났다. M-200모듈에서의 50% 막힘조건과 M/KN-400모듈의 정상조건 개념을 그림3에 도식적으로 나타내었다

그림3과 같이 M/KN-400모듈은 공기입출구가 절반이 막힌 상태의 M-200모듈과는 정확히 일치하지는 않는다. 2열의 실린더 배열로 구성된 M-200모듈과는 달리 M/KN-400모듈의 경우, 4열의 실린더 배열로 구성되어 2열과 3열사이의 중간에는 열이 빠져나갈 수 있는 출구가 없기 때문에 벽과 상부슬라브에서의 온도차는 M-200모듈에서의 정상조건온도 대비 30% 증가보다 더 높을 것으로 예상된다. CATHENA 전산코드를 사용하여 M/KN-400모듈의 벽과 상부슬라브에 대해 계산한 온도차는 18.8℃와 21.9℃로서 M-200모듈에서의 온도차 12.7℃ 및 15.5℃보다 각각 48%, 41%높게 나타났으며, 이 결과는 위에서 언급한 M-200모듈과 M/KN-400모듈과의 차이에서 기인한다고 할 수 있다. M/KN-400모듈에서 실린더와 출구공기와의 온도차(T_c-T_a)가 M-200모듈보다 증가하는 것은 M/KN-400모듈의 중앙에 위치한 실린더 때문이다. 중앙에 있는 실린더는 상호 열복사에 의하여 외곽에 있는 실린더 보다 많은 열을 제거하지 못하면서, 낮은 온도의 콘크리트 벽으로 열전달을 할 수 없기 때문이다. 외곽에 있는 실린더의 경우 실린더와 공기 출구에서의 공기와의 온도차는 12.8℃이다. 이것은 M-200모듈에서의 온도차와 거의 같은 것으로, 외곽에서의 실린더 열전달 조건은 M-200모듈과 매우 유사한 것으로 판단된다.

40℃ 대기온도 조건에서, M/KN-400모듈에 대한 CATHENA 전산코드의 계산결과는 모듈 벽과 상부슬라브의 온도차는 증가하는 것으로 나타났고, 실린더와 출구공기와의 온도차는 5℃ 대기온도에 비해 감소를 보이고 있다. 이것은 열복사에 의하여 5℃의 대기온

도 조건보다 고온측 온도에서 보다 많은 열을 실린더를 통해 벽과 상부슬라브로 열을 전달하는 것으로 판단된다.

대기온도 40℃의 정상조건에서의 콘크리트 온도분포는 그림4와 같으며, 최대 평균온도는 상부슬라브에서 53℃ 였으며, 최대 국부온도는 벽면에서 69℃를 나타내고 있어서 ACI 349 요건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후계획

M-200 모듈의 실측 온도값과 CATHENA 전산코드에 의한 계산결과를 비교 평가하여 CATHENA 전산코드의 적합성을 입증하였다. 또한, 검증과정에서 계산된 K계수와 대류열전달계수를 M/KN-400 열해석 모델에 입력하여 모사를 수행하였다.

M/KN-400모듈에 대한 열해석은 두 가지 조건에 대해 수행하였다: 5℃ 대기온도의 정상운전조건, 40℃ 대기온도의 정상운전조건에 대해서 계산하였다. 대기온도 40℃의 정상운전조건에서 콘크리트 벽과 상부슬라브에서 온도차는 19.6℃와 22.8℃로 나타났다.

결론적으로, 대기온도 40℃인 정상운전조건에서 M/KN-400모듈에서의 온도 계산결과는 최대 평균콘크리트온도가 53℃로 나타났으며, 국부적으로는 최대 콘크리트온도가 69℃로 나타났다. 이 온도 계산결과는 미국 ACI 349 코드에서 규정하고 있는 콘크리트 허용온도를 만족하는 것으로 나타났기 때문에 M/KN-400모듈은 열적으로 안전함을 알 수 있다.

본 해석결과는 M/KN-400 모듈설계를 위한 예비해석으로, 향후 열응력 감소를 통한 추가적인 안전여유도를 확보하기 위해 설비개선을 하고자 한다.

6. 참고문헌

[1] R. shill, "Étude du comportement thermique du module CANSTOR #2", AECL Technical Document, 66-62500-220-002, 2000 November.

[2] R. Beaudoin, "CANSTOR Structural Thermal Transient Evaluation", AECL report, XC-25000-220-09, Rev.0, 1992 September.

표 1. CATHENA 전산코드 계산결과와 온도실측치 비교
(M-200모듈 벽체 공기출입구)

Q (w)	Tc-Ta		온도차	Ta-Tamb		온도차
	실측치 (℃)	계산결과 (℃)	계산결과 - 실측치(℃)	실측치 (℃)	계산결과 (℃)	계산결과 - 실측치(℃)
1848	7.6	7.3	-0.3	9.4	9.1	-0.3
2520	9.6	9.4	-0.2	11.7	11.5	-0.2
2652	9.9	9.8	-0.1	12.1	11.9	-0.2
2916	10.7	10.6	-0.1	13.0	12.8	-0.2
3648	12.6	12.6	0.0	15.1	15.1	0.0

표 2. CATHENA 전산코드 계산결과와 온도 실측치 비교
(M-200모듈벽과 상부 슬라브)

Q (w)	dTw		온도차	dTroof		온도차
	실측치 (℃)	계산결과 (℃)	계산결과 - 실측치(℃)	실측치 (℃)	계산결과 (℃)	계산결과 - 실측치(℃)
1848	7.4	7.8	0.4	8.7	9	0.3
2520	9.5	9.7	0.2	11.3	11.5	0.2
2652	9.5	10.1	0.2	11.8	11.9	0.1
2916	10.6	10.8	0.2	12.7	12.8	0.1
3648	12.7	12.7	0.0	15.3	15.3	0.0

표 3. CATHENA에 의한 M-200모듈과 M/KN-400모듈에서의 온도구배 계산결과

모듈명	T_{amb} (℃)	막힘여부	T_c-T_a (℃)	T_a-T_{amb} (℃)	dT_w (℃)	dT_{roof} (℃)
M-200	5	x	12.6	15.1	12.7	15.3
M/KN-400	5	x	14.7	24.5	18.8	21.9
M/KN-400	40	x	13.4	24.5	19.6	22.8
M/KN-400	40	O	12.8	32.2	24.5	28.6

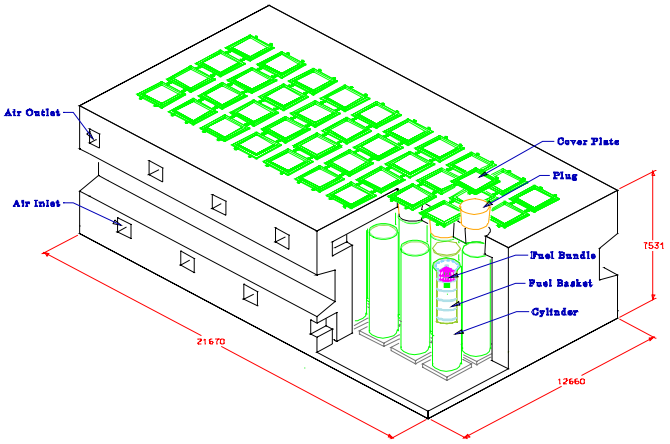
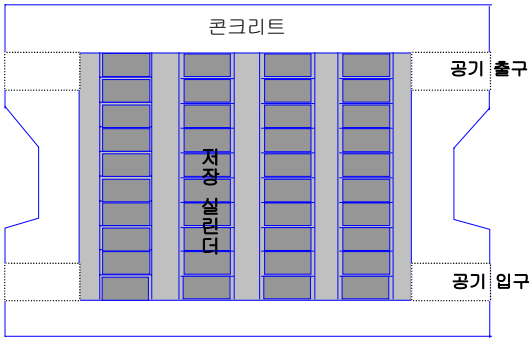
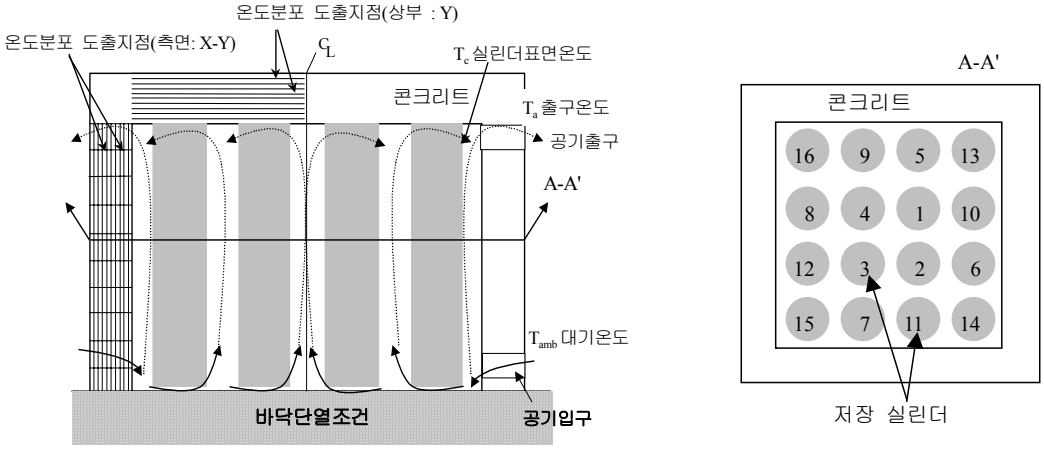


그림 1. M/KN-400모듈의 형상 및 크기



(a) 저장모듈 실제 단면형태



(b) CATHENA 모델링

그림 2. M/KN-400모듈의 열해석 모델링

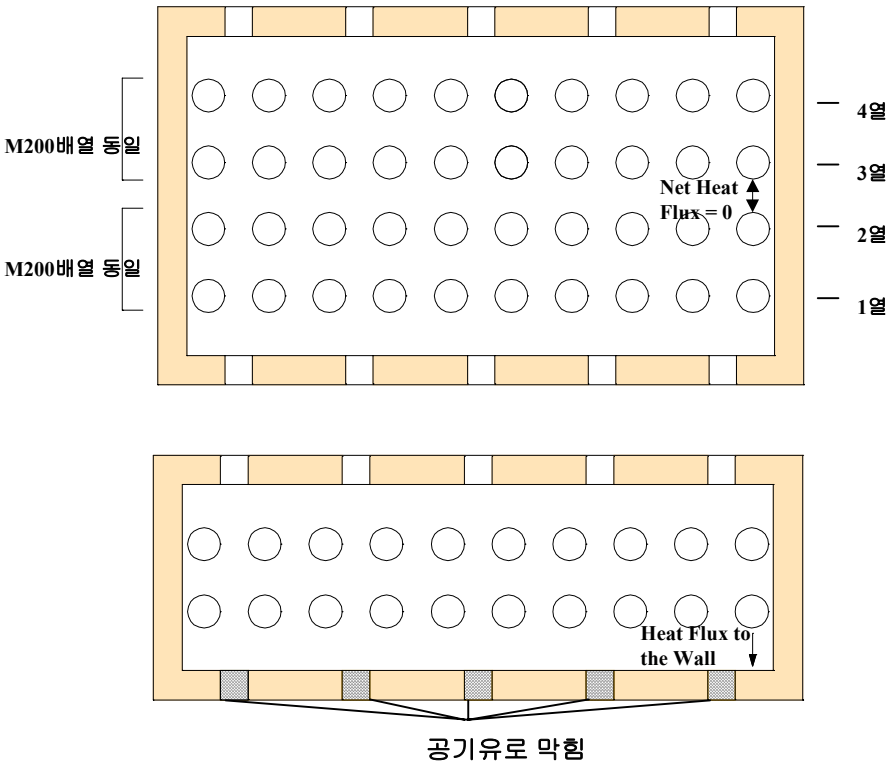


그림 3. M-200 모듈의 50% 막힘조건과 M/KN-400모듈의 개념도

All temperatures are in °C

TOP SLAB

nodes ↓	temp.	
1	65	inner surface
2	62	
3	59	
4	57	
5	54	
6	52	
7	49	
8	47	
9	44	
10	42	upper surface
average	*53*	
dT	*23*	

MAXIMUM TEMPERATURES

location	temp
cylinders	81

air mass flowrate 2.20 kg/s

Heat evacuated through the air circuit = 94 %

WALL

axial nodes: 1 at the bottom, 10 at the top

radial nodes ↓	1 →	2	3	4	5	6	7	8	9
1	49	52	54	57	59	62	64	66	69
2	48	50	52	55	57	59	61	63	65
3	47	49	51	53	54	56	58	60	62
4	46	47	49	51	52	54	55	57	59
5	45	46	47	49	50	51	53	54	55
6	44	45	46	47	48	49	50	51	52
7	43	44	44	45	46	47	48	48	49
8	42	43	43	44	44	45	45	46	46
9	41	41	42	42	42	43	43	43	44
10	40	40	40	41	41	41	41	41	41
average	*44*	*45*	*46*	*48*	*49*	*50*	*51*	*52*	*53*
dT	*9*	*12*	*14*	*16*	*18*	*21*	*23*	*25*	*28*

그림4. 정상조건의 콘크리트 모듈의 온도분포(대기온도 40℃)