

# 해인사 장경판전 주변 건축물 이건에 따른 장경판전 환기 기류 변화 해석

허 남 건<sup>†</sup>, 이 명 성<sup>\*</sup>, 양 성 진<sup>\*</sup>  
서강대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>서강대학교 대학원 기계공학과

## Numerical Simulation of Ventilation in the Storage Hall of Tripitaka Koreana at Haein Temple in Case of Building Rearrangement

Nahmkeon Hur<sup>†</sup>, Myungsung Lee<sup>\*</sup>, Sungjin Yang<sup>\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

<sup>\*</sup>Graduate School, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

(Received September 18, 2006; revision received March 22, 2007)

**ABSTRACT:** In the present study, ventilation flow in the Janggyeongpan-Jeon at Haein temple in case of building rearrangement has been investigated numerically. To achieve more accurate results, detailed shapes such as buildings and the window grills are modeled and tree canopy model is adopted to account for the effect of trees in the computation. Wind velocities as boundary condition are taken from meteorological statistical data. The numerical results show that ventilation flow distributions at Janggyeongpan-Jeon in case of building rearrangement are nearly similar to those before rearrangement.

**Key words:** Ventilation(환기), Flow analysis(유동해석), Haein temple(해인사), Tripitaka Koreana (팔만대장경), Storage hall(판고), CFD(전산유체역학)

### 기 호 설 명

- $F_i$  : 운동량방정식 추가항
- $F_k$  :  $k$  수송방정식 추가항
- $F_e$  :  $e$  수송방정식 추가항

### 하첨자

- $k$  : 난류 운동에너지
- $e$  : 에너지 소산율

### 1. 서 론

합천에 위치한 해인사는 해발 900 m의 산 중턱에 위치한 사찰이다. 해인사의 경판(팔만대장경)을 보존하기 위한 판고는 국보 52호로서 1398년 인 태조 7년에 건립되었다. 또한 팔만대장경은 그보다 160여년 앞선 1236년에 제작을 시작하여 1251년에 완성되었다. 따라서 판고는 약 600년, 경판은 750년 동안 보존되어 온 것이다. 긴 시간임에도 불구하고 판고와 경판은 아직까지 원형의 상태를 유지하고 있다.

한편 팔만대장경이 보관된 범보전의 비로자나 불상에 금철을 하던 중 불상 내부에서 제작 연대가 적힌 명문이 발견되었다. 질량분석기 이온빔가속기(AMS)로 분석하고 보정작업을 수행한 결과,

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-712-0799

E-mail address: nhur@sogang.ac.kr

비로자나 불상은 9세기 통일신라시대에 제작된 목조 불상이라는 결과를 얻었다.<sup>(1)</sup> 이에 따라 불상의 보존을 위해 비로전을 새로 건립할 예정이다. 비로전은 팔만대장경이 보관되어 있는 판고 서쪽에 건립되고, 그에 따라 기존의 건물들은 다른 곳으로 이전된다. 이와 같이 비로전이 건립되고, 판고 주변 건물들이 재배치되므로 경관의 보존에 영향을 미치는 판고 주변 기류와 환기량의 변화에 대한 연구가 필요함은 당연하다.

기존의 팔만대장경과 판고에 대한 연구는 대부분 경관의 재질 및 제작 방법 그리고 판고의 구조 등에 대한 연구가 주를 이루어 왔으며 환기 측면에서 기류의 측정 연구는 수행된 적이 있으나 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 환기 기류 예측 연구는 거의 이루어지지 않았다. 최근 복잡한 유동현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 파악하는 전산유체역학(CFD)의 발전으로 과거 해석이 불가능했던 복잡한 지형에서의 기류를 예측할 수 있게 되었으며 허남건과 김태균의 연구에서 판고 앞의 담장 높이가 판고 환기에 미치는 영향을 규명한 바 있다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 판고 주변의 기류와 환기량을 보다 정확히 해석하기 위해 풍향, 풍속, 숲 지형 모사를 변수로 지정하여 각 변수의 영향을 분석하였다. 그리고 최종적으로 모든 변수를 고려하여 수치해석을 수행함으로써 건물 재배치에 따른 장경관전 주변 기류와 환기량의 변화에 대하여 연구하였다. 위와 같이 판고 주변 기류의 유동을 해

석하고 유·출입되는 공기의 환기량을 시뮬레이션 함으로써 이전 되거나 건립되는 건물들의 설계 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 수치해석 대상 및 방법

### 2.1 수치해석 대상

해인사의 배치도는 Fig. 1과 같다. ①은 수다라

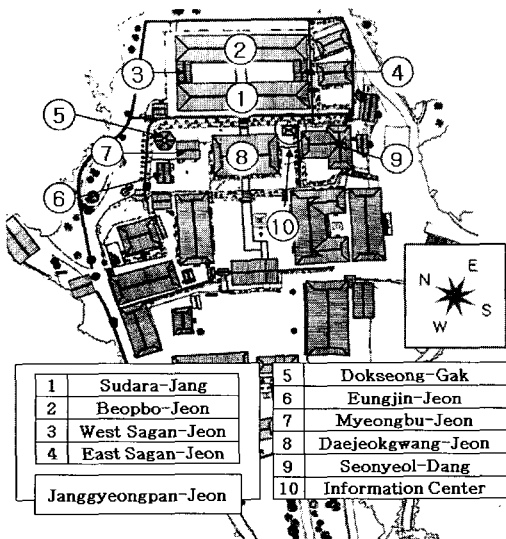
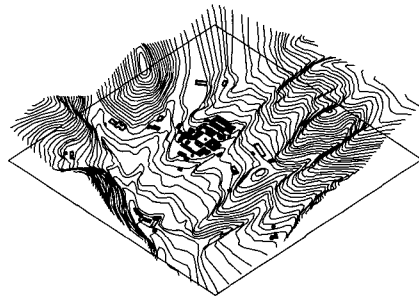
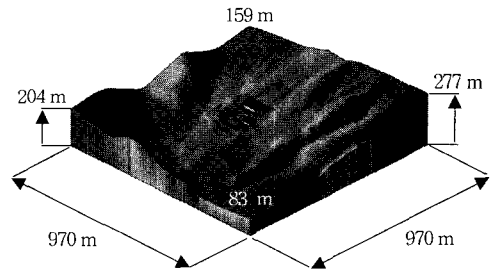


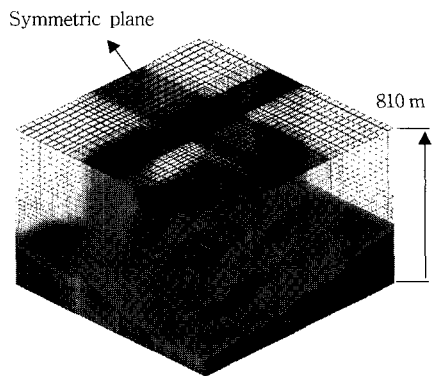
Fig. 1 Layout and direction of Haerin temple.



(a) CAD contour map



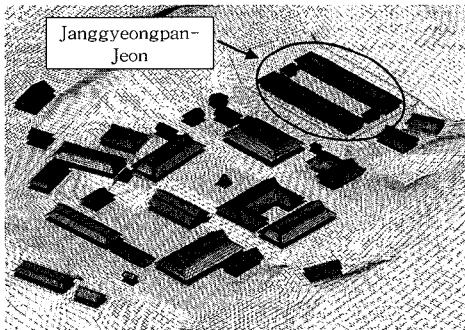
(b) Computational mesh around Haerin temple



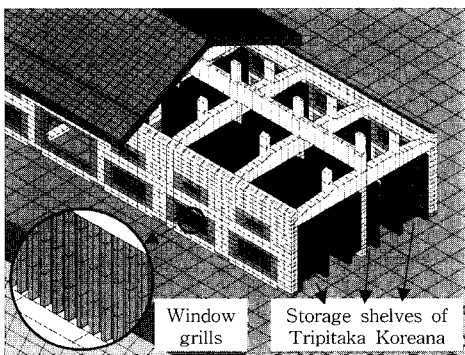
(c) Total computational domain

Fig. 2 Computational domain.

장이고 ②는 범보전이며 ③과 ④는 각각 서사간전과 동사간전이다. ①~④는 모두 팔만대장경이 보관되어 있는 판고(이하 장경판전)이다. Fig. 2(a)와 같은 해인사 주변의 충분히 넓은 지역에 대한 3D 등고선 데이터를 이용하여, Fig. 2(b)와 같이 지면 격자를 구성하였다. 그리고 Fig. 2(c)와 같이 경계면의 영향을 받지 않도록 상공을 충분한 높이로 설정하였다. Fig. 3(a)에 모든 건물 격자들의 형상이 나타나 있고, 팔만대장경이 보관되어 있는 장경판전의 위치가 표시되었다. 해인사 내 모든 건축물의 크기 및 위치는 해인사 건축도집<sup>(3)</sup>의 자료에 의거하였다. 장경판전에 유출입되는 환기량을 보다 정확히 예측하기 위해 정확한 치수와 형태의 통풍구 격자를 구성하였고 통풍구의 창살은 환기량에 영향을 미치는 중요한 유동저항이므로 건축도집<sup>(3)</sup>에 명시된 창살 개수대로 계산 격자에 반영되었다. 장경판전 내부의 유동 저항인 창살, 판가, 기둥, 보 등은 Fig. 3(b)와 같이 구체적으로 모델링하였다.



(a) Detailed mesh around Haein temple



(b) Detailed mesh of Janggyeongpan-Jeon

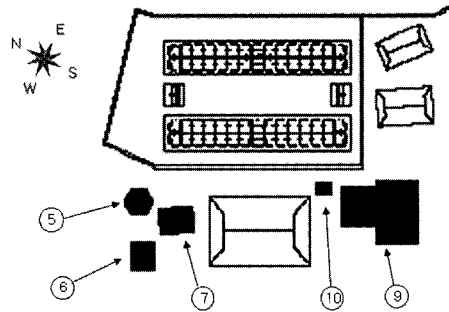
Fig. 3 Detailed computational mesh.

## 2.2 수치해석 방법

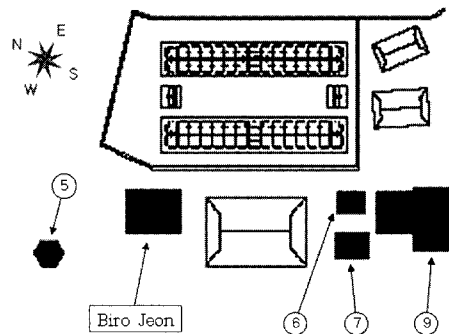
장경판전 주변 건물들의 재배치로 인한 장경판전 주변의 유동과 환기량을 비교하기 위해 해석 조건을 공사전과 공사후로 구분하였다. Fig. 4는 공사전과 공사후의 건물 위치를 각각 나타낸다. 독성각(⑤)은 새로 건립되는 비로전의 북서쪽으로 이동하고, 선열당(⑨)이 남쪽으로 옮겨지면서 기존의 선열당 자리에는 응진전과 명부전이 이격되며 응진전(⑥)과 명부전(⑦)이 있던 자리에 비로전이 건립된다. 그리고 선열당과 대적광전 사이에 있는 안내실(⑩)은 철거된다.

산 중턱에 위치한 해인사는 산곡풍의 영향을 받아 낮에는 남남서풍인 곡풍으로 밤에는 북북동풍인 산풍으로 주유동의 방향이 바뀐다. 바람의 방향은 Fig. 1의 대적광전 오른쪽 밑에서 장경판전 왼쪽 위로 올라갈 때는 남남서풍이고 반대 방향은 북북동풍이다.

수치해석 격자의 경계조건은 입구, 출구, 대칭면



(a) Before construction



(b) After construction

Fig. 4 Building arrangement of Haein temple.

이 사용되었다. 경계조건에 입력되는 속도는 해인사가 위치한 가야산의 기상정보를 자동으로 기록하는 무인자동기상관측장비(AWS)의 지난 4년간의 풍속데이터를 적용하였다.<sup>(4)</sup> 연평균 속도인 1 m/s와 환기에 불리하게 작용할 것으로 예상되는 최저 속도인 0.6 m/s로 각각 해석 Case를 구분하였다.

산 지형을 포함한 해인사 주변의 기류는 숲의 나무들을 통과하면서 속도가 감소되고 기류가 혼합되는 정도는 증가하여 난류 형성이 촉진된다. 이러한 현상을 모사하기 위해 운동량 방정식에  $-F_i$ 를 추가하여 속도의 감소를 표현하였고  $k-\epsilon$  수송방정식에  $+F_k$ 과  $+F_\epsilon$ 를 추가하여 난류에너지와 소산율의 증가를 모사하였다.<sup>(5)</sup>

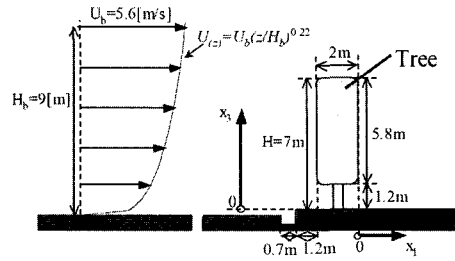
숲 모사를 위해 사용된 Tree canopy model<sup>(5)</sup>의 추가항은 다음과 같다.

$$F_i = \eta C_f a u_i \sqrt{u_j u_j} \quad (1)$$

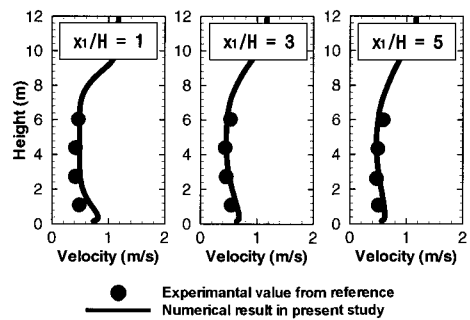
$$F_k = u_i F_i \quad (2)$$

$$F_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} C_{pe1} F_k \quad (3)$$

식(1)은 운동량 방정식의 추가항이고, 식(2)와 식(3)은 각각  $k$ 와  $\epsilon$ 에 관한 수송방정식의 추가항이다. 각각의 추가항에 포함된 변수의 의미는 다음과 같다.  $\eta$ 는 지면에서 숲이 차지하는 비율이고  $C_f$ 는 항력계수이며  $a$ 는 나뭇잎의 면적 조밀도를 뜻하고  $C_{pe1}$ 는  $F_\epsilon$ 의 Tree canopy model에 대한 계수이다. 본 연구에서는 Mochida et al.<sup>(5)</sup>이 제시한 Tree canopy model을 사용하였고  $C_{pe1} = 1.5$ ,  $\eta C_f a = 0.7$ 을 추가항에 적용하였다. 숲에 의해 기류의 속도가 감소되는지 확인하고자 Fig. 5(a)와 같이 참고 문헌<sup>(5)</sup>에 제시된 도메인으로 예비 해석을 수행하였다. Fig. 5(b)는 예비 해석의 결과로서 나무를 지나는 지점의 거리에 따른 유동의 속도 변화를 나타낸 그림이다. 이 때 원형 표식은 참고 문헌의 연구에서 실시한 실험에 의한 측정값을 나타내고 실선은 본 연구의 예비 해석에 따른 결과값을 나타낸다. 참고 문헌의 실험에 의한 측정값과 본 연구의 예비 해석의 결과값은 Fig. 5(b)와 같이 서로 유사한 경향성을 보인다. 위와 같이 예비해석을 통하여 검증된 Tree canopy model을 해석격자에 반영하였고 해석격자에서 나무의 높이는 13~15 m로 설정하였다.



(a) Computational domain ( $x_1$  : stream wise)<sup>(5)</sup>



(b) Comparison of velocity profiles behind tree

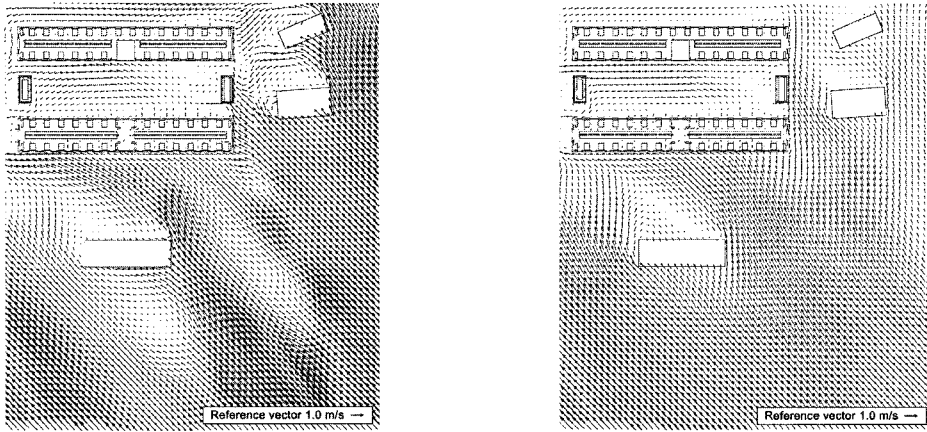
Fig. 5 Verification of Tree canopy model.

이상과 같이 장경관전 주변 기류와 환기량 예측 시 신뢰성 있는 수치해석이 수행될 수 있도록 풍향, 풍속, 숲 모사 유무를 변수로 적용하였고 각각 공사전과 공사후로 구분한 해석 Case를 Table 1에 나타내었다.

장경관전의 공사 전, 후 유동 해석 및 장경관전의 환기량을 예측하기 위해 본 연구에 사용된 수치해석 프로그램은 상용코드인 STAR-CD v3.24<sup>(6)</sup>이고 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하였다. 압

Table 1 Cases for numerical analysis

Case	Wind direction	Wind velocity	Tree canopy model	Construction
1b	North -northeastern	1 m/s	×	Before
1a				After
2b	South -southwestern	1 m/s	×	Before
2a				After
3b	South -southwestern	0.6 m/s	×	Before
3a				After
4b	South -southwestern	1 m/s	○	Before
4a				After



(a) Case 2b (not considering tree canopy model) (b) Case 4b (considering tree canopy model)

Fig. 6 Velocity vector plot around Janggyeongpan-Jeon (height = 2.8 m).

력보정 알고리즘은 SIMPLE을 사용하였고 난류 모델은  $k-\epsilon$  High Reynolds Number 모델을 적용하였다. 전체 계산 격자수는 750만개이고 본 연구실의 Opteron 64bit 6cpu Linux cluster를 사용하여 각각의 Case마다 48시간이 소요되었다.

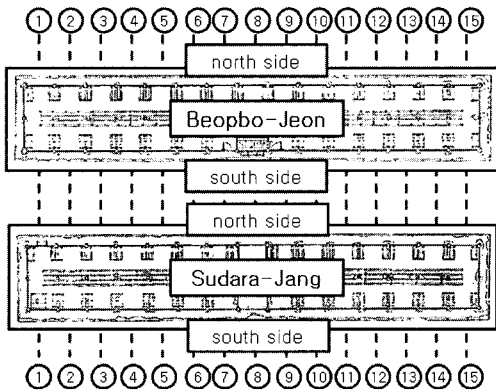
### 3. 결과 및 고찰

해인사 주변의 풍향이 낮과 밤에 따라서 각각

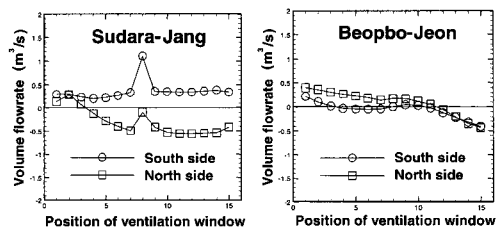
곡풍과 산풍으로 바뀌므로 방향의 변화에 따른 환기량의 비교가 필요하다. 곡풍은 남남서풍이고 산풍은 북북동풍이므로 각각 Case 2b와 Case 1b에 해당한다. Case 1b의 수다라장 주변의 유동은 북북동풍이 작용하므로 북입면에는 유입이 발생하고 남입면에는 유출이 발생한다. 반대로 Case 2b의 수다라장의 주변의 유동은 남남서풍이 작용하므로 Case 1b와 반대로 남입면에서 유입이 발생하고 북입면에서 유출이 나타난다. 범보전의 유동은 Case



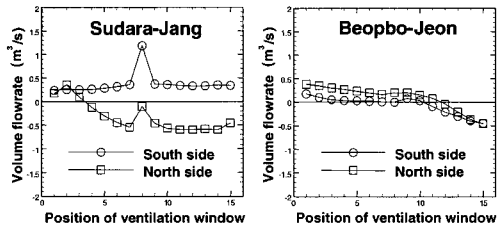
(a) Front view of ventilation window



(b) Number of ventilation window



(c) Case 4b (before construction)



(d) Case 4a (after construction)

Fig. 7 Ventilation flow distribution at Janggyeongpan-Jeon.

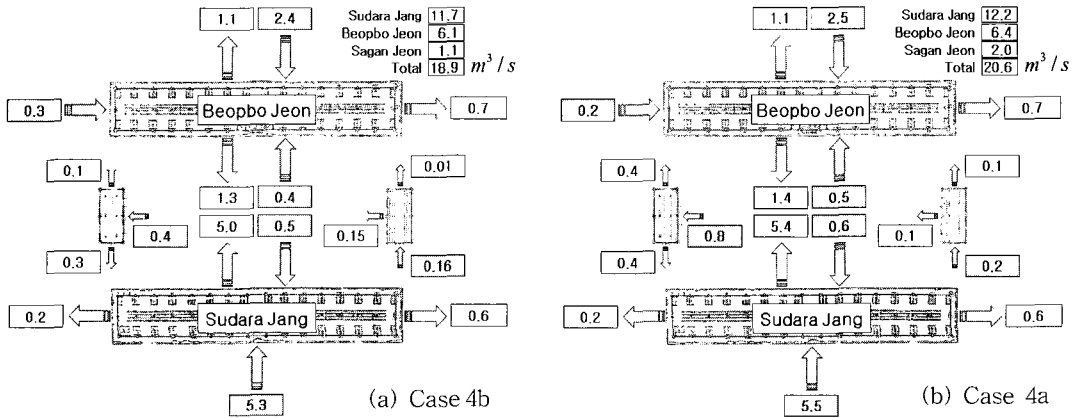


Fig. 8 Ventilation flow distributions through each side of Janggyeongpan-Jeon.

1b의 경우에 북입면에는 유입이 발생하고 남입면에는 유출이 나타나지만, Case 2b의 북입면에는 Case 1b보다 더 약한 유입이 발생하고 남입면에는 유출과 유입이 번갈아서 나타나는 현상을 보인다.

풍속이 환기량에 미치는 영향을 알기 위하여 남남서풍이 작용할 때 경계조건의 속도가 1.0 m/s인 Case 2b와 0.6 m/s인 Case 3b로 구분하여 결과를 비교하였다. 유동의 방향이 아닌 속도가 감소한 것이므로 수다라장과 범보전에서 통풍구의 위치에 따른 환기량의 변화는 Case 3b와 Case 2b가 서로 비슷한 형태를 보이지만 Case 3b의 유입·유출량이 Case 2b보다 더 감소한 것이 확인된다.

전체 해석 격자에서 가장 큰 유동 저항인 숲의 영향을 알기 위해 다른 모든 조건은 동일하고 숲을 모사한 Case 4b와 숲을 모사하지 않은 Case 2b의 환기량을 비교하였다. Fig. 6과 같이 숲의 나무를 통과하면서 기류가 혼합되어 속도가 전체적으로 고르게 되는 것을 확인할 수 있다. 숲이 모사된 Case 4b의 경우 모든 통풍구의 환기량이 Case 2b보다 감소하였다. 하지만 숲을 모사한 Case 4b의 환기량은 0.6 m/s의 풍속이 적용된 Case 3b보다는 더 크다.

모든 변수를 고려한 상태에서 공사로 인한 건물 재배치가 환기량에 미치는 영향을 알기 위해 Case 4b와 Case 4a를 비교하였다. Fig. 7와 같이 수다라장과 범보전의 남입면과 북입면에서 통풍구에 따른 환기량은 공사 전과 공사 후에 서로 유사하고 Fig. 8과 같이 장경관전 건물의 각 입면에 대한 유입·유출량도 공사 전·후에 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

본 연구에서는 경관의 보존에 영향을 미치는 장경관전 각 건물들의 환기 유동을 수치해석하였다. 해석 결과의 정량적인 표현을 위해 Fig. 9에 수다라장, 범보전, 장경관전 전체 건물 그리고 각각의 해석 Case에 따른 환기량을 나타내었다. Fig. 9(a)~Fig. 9(c)의 x축에 표시된 숫자는 해석 케이스를 의미하고 검정색과 회색 막대 그래프는 각각 공사 전과 공사 후를 의미한다. 서사간전과

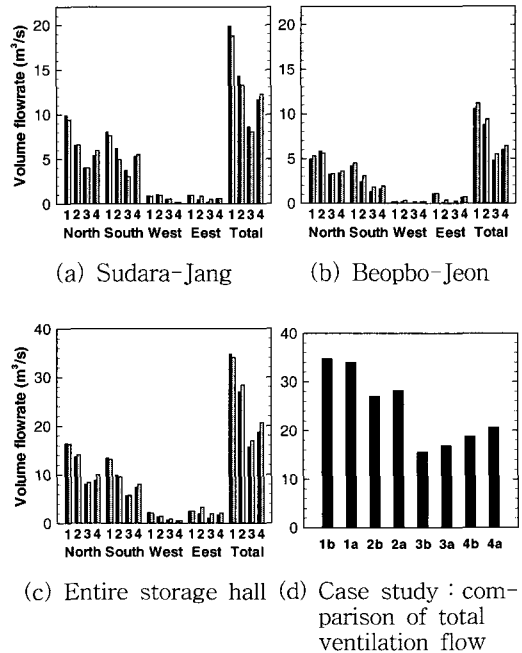


Fig. 9 Comparison of numerical results of ventilation flow.

동사간전의 환기량은 수다라장과 법보전에 비해 소량이고, 수다라장과 법보전의 북·남입면의 환기량이 서·동쪽면에 비해 상당히 높은 편으로 나타났다. 따라서 수다라장과 법보전의 북·남입면 환기량이 전체 환기량 중에서 가장 많은 비중을 차지함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

풍향, 풍속, 숲 모사 유무와 같은 여러 가지 변수를 적용하고 수치해석을 수행하여 각 변수의 영향을 분석하였다. 그리고 최종적으로 모든 변수를 고려하여 장경관전 주변 건물들의 이면 및 건립으로 인한 공사 후의 장경관전 주변 기류와 환기량을 공사 전과 비교하였다. 그 결과 공사전과 공사후의 유동패턴이 유사하며 수다라장과 법보전 그리고 사간전의 총환기량은 공사전과 공사후가 거의 같음을 알 수 있다. 이는 이면 및 신축되는 건축물의 높이와 크기 및 위치가 환기 유동을 심각하게 방해하지 않게 설계되었기 때문으로 생각된다.

#### 참고 문헌

1. <http://news.buddhapia.com/news/BNC000/BNC0008243.html>.
2. Hur, N., Jeong, S. and Kim, T.G., 1998, Analysis of natural ventilation flow in the storage hall of Tripitaka Koreana at Haein temple, Proceedings of the SAREK Winter Annual Meeting, pp.509-514.
3. Lee, S.H., 1994, Haein temple architectural plan, Hansaem.
4. Climate information data from the management system of Korea Meteorological Administration, Mountain Gaya, 2002-2005.
5. Mochida, A., et al., 2006, Optimization of tree canopy model for CFD prediction of wind environment at pedestrian level, The 4th Symposium CWE, Vol. 4, pp.561-564.
6. STAR-CD manual version 3.24, 2004, Computational Dynamics Ltd.