



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



석사학위논문

2019년 2월

해양지중 저장 중

누출된 이산화탄소의 다중규모 확산
시뮬레이션을 위한 기초적인 연구

조선대학교 대학원

선박해양공학과

정 대 성

해양지중 저장 중
누출된 이산화탄소의 다중규모 확산
시뮬레이션을 위한 기초적인 연구

A Fundamental Study for
Numerical Simulation of Multi-Scale Diffusion of CO₂
Leaked from Sea Floor

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

선박해양공학과

정 대 성

해양지중 저장 중 누출된 이산화탄소의 다중 규모 확산 시뮬레이션을 위한 기초적인 연구

지도교수 정 세 민

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

선박해양공학과

정 대 성

정대성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 권영섭 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

위원 조선대학교 교수 정세민 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

Contents

ABSTRACT

XVI

제1장 서론	1
제1절 배경	1
제2절 관련 연구	9
제3절 연구 목적	10
제2장 다중규모 해양수치모델	11
제1절 MEC-CO ₂ 모델	11
제2절 지배방정식	12
1. 중규모 영역: 정수압(Hydrostatic) 모델	12
2. 근방역: Full 3D Lagrangian-Eulerian 모델	14
제3장 수치 시뮬레이션	16
제1절 시뮬레이션 조건	16
1. 해석 영역	16
2. 격자계	17
가. 중규모 영역	17
나. 근방역	18
3. 경계 조건	19

4. 계산 조건	21
가. 온도, 염분, 해수 중 용해된 $\text{CO}_2(\text{DCO}_2)$ 초기조건	21
나. CO_2 누출량, 누출 비율 및 누출 지점	22
다. 해석 parameter	23
제2절 요약	24
제4장 수치 시뮬레이션 결과	26
제1절 조위 비교	26
제2절 근방역	31
제3절 중규모 영역	39
제4절 결과 요약	45
제5장 결론	47
참고문헌	48
부록	
A.1 격자 수렴도 테스트	53
A.2 근방역에서의 해수중 용해된 $\text{CO}_2(\text{DCO}_2)$ 변화량(ΔC)	58
A.3 근방역에서의 CO_2 분압($p\text{CO}_2$) 변화량($\Delta p\text{CO}_2$)	70
A.4 중규모 영역에서의 해수중 용해된 $\text{CO}_2(\text{DCO}_2)$ 변화량(ΔC)	82
A.5 중규모 영역에서의 CO_2 분압($p\text{CO}_2$) 변화량 $\Delta p\text{CO}_2$	94

Table Contents

Table 1 Major countries' NDC(Nationally Determined Contribution) for Paris Agreement	2
Table 2 Greenhouse gases & their contribution to global warming	3
Table 3 Cases for grid dependency test	17
Table 4 Number of grids and sizes(dz) in z direction for grid dependency tests	17
Table 5 Tidal components for simulation	19
Table 6 Cases of leakage & initial CO ₂ bubble ratio	22
Table 7 Simulation parameters	23

Figure Contents

Fig. 1 The average global temperature index from 1880 to ongoing prediction analysis	1
Fig. 2 CCS projects worldwide	4
Fig. 3 Overview of CO ₂ storage technologies	5
Fig. 4 Schematic view of CO ₂ leakage	6
Fig. 5 Phase diagram of CO ₂	7
Fig. 6 Behavior of CO ₂ bubble/droplet in sea water	7
Fig. 7 Quantitative criteria for biological impacts by ΔpCO ₂	8
Fig. 8 Candidate sites for geological storage of CO ₂ under sea floor	10
Fig. 9 Comparison between (a) satellite view and (b) topography data in top view	16
Fig. 10 Selected grid system for meso-scale region (No. of grid in x, y, z direction: 80 × 80 × 68) (a) top ward, (b) perspective views	18
Fig. 11 Computed domain of small-scale region in meso-scale region	18
Fig. 12 Location of small-scale region in (a) meso-scale region and (b) small-scale region grid	19
Fig. 13 Initial condition (temparature [T], salinity [S], dissolved CO ₂ [DCO ₂ , C] and density [R])	21
Fig. 14 Leakage area in small-scale region	22
Fig. 15 Locations of tidal level comparison	26
Fig. 16 Comparison of tidal level at north boundary(No. 4)	27
Fig. 17 Comparison of tidal level at south boundary(No. 2)	27
Fig. 18 Comparison of tidal level at east boundary(No. 3)	27
Fig. 19 Comparison of tidal level at southeast boundary(No. 13)	27
Fig. 20 Comparison of tidal level at northeast boundary(No. 14)	28
Fig. 21 Comparison of tidal level near land area 1(No. 5)	28
Fig. 22 Comparison of tidal level near land area 2(No. 6)	28
Fig. 23 Comparison of tidal level near land area 3(No. 7)	28
Fig. 24 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 1)	29
Fig. 25 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 10)	29
Fig. 26 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 11)	29
Fig. 27 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 12)	29
Fig. 28 Comparison of tidal level at leakage point(No. 8)	30
Fig. 29 Comparison of tidal level in the southwest area of simulation domain(No. 9)	30

Fig. 30 Comparison contour maps of void rate including leakage point in xz-plane(y= 1,125m) after 30 days of CO ₂ leakage with the different leakage amount in small scale region ((left): 3,800ton/year, (right): 94,600ton/year)	31
Fig. 31 Comparison contour maps of void rate including leakage point in yz-plane(x= 1,125m) after 30 days of CO ₂ leakage with the different leakage amount in small scale region ((left): 3,800ton/year, (right): 94,600ton/year)	32
Fig. 32 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point after 30 days of CO ₂ leakage with the different leakage amount in small scale region((a) : xz-plane(y= 1,125m), (b) : yz-plane(x= 1,125m))	33
Fig. 33 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point after 30 days of CO ₂ leakage with the different leakage amount in small scale region((a) : xz-plane(y= 1,125m), (b) : yz-plane(x= 1,125m))	34
Fig. 34 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane(y= 1,125m) with the different CO ₂ bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO ₂ leakage	35
Fig. 35 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane(x= 1,125m) with the different CO ₂ bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO ₂ leakage	36
Fig. 36 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane(y= 1,125m) with the different CO ₂ bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO ₂ leakage	37
Fig. 37 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane(x= 1,125m) with the different CO ₂ bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO ₂ leakage	38
Fig. 38 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point after 30 days of CO ₂ leakage with the different leakage amount in meso-scale region((a) : xz-plane(y= 108,000m), (b) : yz-plane(x= 63,000m))	39
Fig. 39 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point after 30 days of CO ₂ leakage with the different leakage amount in meso-scale region((a) : xz-plane(y= 108,000m), (b) : yz-plane(x= 63,000m))	40
Fig. 40 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane(y= 108,000m) with the different CO ₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO ₂ leakage	41

- Fig. 41 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane(x=63,000m) with the different CO₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage 42
- Fig. 42 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane(y=108,000m) with the different CO₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage 43
- Fig. 43 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane(x=63,000m) with the different CO₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage 44

부록 그림 목차

Fig. A.1-1 Location of comparison point	53
Fig. A.1-2 Comparison of tidal level at No.1	53
Fig. A.1-3 Comparison of tidal level at No.2	53
Fig. A.1-4 Comparison of tidal level at No.3	54
Fig. A.1-5 Comparison of tidal level at No.4	54
Fig. A.1-6 Comparison of tidal level at No.5	54
Fig. A.1-7 Comparison of tidal level at No.6	54
Fig. A.1-8 Comparison of tidal level at No.7	55
Fig. A.1-9 Comparison of tidal level at No.8	55
Fig. A.1-10 Comparison of tidal level at No.9	55
Fig. A.1-11 Comparison of tidal level at No.10	55
Fig. A.1-12 Comparison of tidal level at No.11	56
Fig. A.1-13 Comparison of tidal level at No.12	56
Fig. A.1-14 Comparison of tidal level at No.13	56
Fig. A.1-15 Comparison of tidal level at No.14	56
Fig. A.2-1 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	57
Fig. A.2-2 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	58
Fig. A.2-3 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	59
Fig. A.2-4 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	60
Fig. A.2-5 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	61

Fig. A.2-6 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	62
Fig. A.2-7 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	63
Fig. A.2-8 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	64
Fig. A.2-9 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	65
Fig. A.2-10 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	66
Fig. A.2-11 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	67
Fig. A.2-12 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	68
Fig. A.3-1 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	69
Fig. A.3-2 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	70
Fig. A.3-3 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	71
Fig. A.3-4 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	72

Fig. A.3-5 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	73
Fig. A.3-6 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	74
Fig. A.3-7 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	75
Fig. A.3-8 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	76
Fig. A.3-9 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	77
Fig. A.3-10 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	78
Fig. A.3-11 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	79
Fig. A.3-12 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	80
Fig. A.4-1 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	81
Fig. A.4-2 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	82
Fig. A.4-3 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	83

Fig. A.4-4 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	84
Fig. A.4-5 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	85
Fig. A.4-6 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	86
Fig. A.4-7 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	87
Fig. A.4-8 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	88
Fig. A.4-9 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	89
Fig. A.4-10 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	90
Fig. A.4-11 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	91
Fig. A.4-12 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	92
Fig. A.5-1 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	93
Fig. A.5-2 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	94

Fig. A.5-3 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	95
Fig. A.5-4 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	96
Fig. A.5-5 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	97
Fig. A.5-6 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	98
Fig. A.5-7 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	99
Fig. A.5-8 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	100
Fig. A.5-9 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	101
Fig. A.5-10 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)	102
Fig. A.5-11 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)	103
Fig. A.5-12 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 63,000m$) in meso-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)	104

ABSTRACT

A Fundamental Study for Numerical Simulation of Multi-Scale Diffusion of CO₂ Leaked from Sea Floor

Jeong Dae Sung

Advisor : Prof. Jeong Se-Min, Ph.D.

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering

Graduate School of Chosun University

Carbon Capture and Storage(CCS) is a technology to capture and store carbon dioxide(CO₂), which is a representative greenhouse gas. Since its potential to reduce large amount of CO₂ and feasibility, many countries are working on various CCS methods and projects. CCS can be categorized by geological sequestration(=storage), ocean sequestration and geological sequestration under seafloor, among which the last one is the most proper option to Korea since there is not enough inland space to store CO₂. However, public acceptance is an unknown factor in developing public policy involving CCS technology. Characteristics of CCS substantially differ from other options for CO₂ mitigation, particularly when assessing the risks of leakage and development of appropriate regulatory penalties in implementing some form of CCS. Therefore, to carry out geological sequestration of CO₂ under seafloor, it is inevitable to evaluate the risk of leakage, to monitor the behavior of leaked CO₂ and to assess the environmental effect by the leaked CO₂.

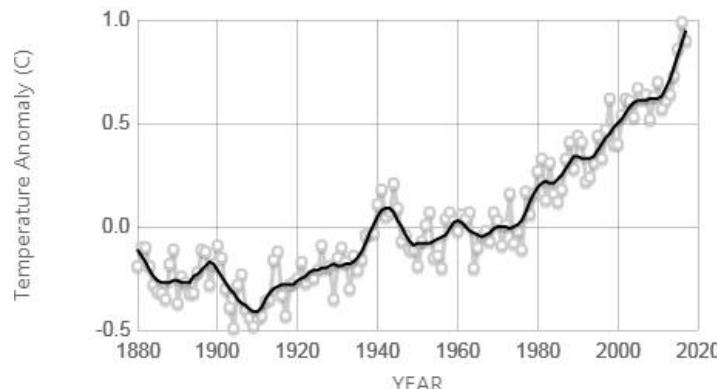
The CO₂ in seawater can exist as liquid or gas phase depending on its surrounding environments, mainly pressure and temperature. Therefore, the behavior of CO₂ bubbles with dissolving into surrounding sea-water and diffusion of dissolved CO₂(DCO₂) by ocean flows should be accurately predicted for the assessment of environmental impacts.

In this study, the behavior and diffusion of CO₂, which is purposely stored under seafloor and leaked from it, bubbles and DCO₂ in the sea-water was numerically predicted by multi-scale ocean model, where hydrostatic approximation and Eulerian-Lagrangian two phase model is applied for meso- and small-scale region, respectively. Two cases are selected by assumed leaking-amount of CO₂, that is 3,800ton/year and 94,600ton/year, and numerical simulations are performed for the cases. The results including the change of partial pressure of CO₂(pCO₂), which is one of the most important criteria for environmental impacts on marine biota, are qualitatively compared with each other.

제1장 서론

제1절 배경

1880년부터 최근까지 지구의 평균 온도가 지속적으로 증가하고 있으며, 2020년 이후에도 증가할 것이라 예측된다(Fig. 1).



Source: climate.nasa.gov

Fig. 1 The average global temperature index from 1880 to ongoing prediction analysis
<<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>>

지구의 평균 온도 상승으로 발생하는 지구 온난화는 해양 및 대기의 온도를 상승시키며, 이로 인하여 해양환경에 영향을 미친다. 해양의 온도가 증가하면, 해수면상승으로 인하여 저지대의 침수, 지하수위의 상승, 해안지역의 침식 및 퇴적 환경의 변화와 더불어 폭풍 영향권의 확대와 하천에서 해수의 침투거리가 길어짐에 따라 생활용수의 취수 장애 등이 발생할 수 있으며, 해양생태계의 교란을 발생시킨다(석문식, 1991). 이중 열대 해양 생물 중 하나인 산호는 온도가 상승할 경우 서로 먹이를 공급하는 공생관계인 조류들이 산호의 주변을 이탈하는 백화 현상(Coral bleaching)이 발생하며, 이로 인하여 생존이 어려워진다. Lesser(1997)은 해양온도 상승이 산호의 백화현상에 영향을 미친다는 것을 실험을 통하여 결론지었다.

또한 해양의 온도 상승은 해양의 산성화(pH값 감소)를 야기시킨다. Pörtner et al.(2004)은 해양생물이 낮은 pH에 노출될 경우, 해양 생물의 신진대사율과 산소 공급율을 감소시키는 것을 분석하였으며, Kroeker et al.(2013)은 해양 산성화가 다양한 생물 군의 생존, 성장 등에 미치는 영향에 대해 실험하였으며, pH가 감소 할 경우, 생물 군의 생존, 성장 등이 감소하는 것을 실험하였다.

이러한 해양환경에 영향을 미치는 지구 온난화의 원인을 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 국제연합환경계획(United Nations Environment Program, UNEP)은 산업 발전 등의 과도한 에너지 사용으로 발생하는 온실가스의 증가로 규정했다.

세계적으로 온실가스의 배출을 줄이기 위해, 2015년 파리에서 열린 유엔 기후 변화 회의(The United Nations Frameworks Convention on Climate, UNFCCC)를 통하여 파리협정(Paris Agreement)을 체결하였다. Table 1은 파리협정에서 각국이 자국 상황에 맞게 설정한 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 보이고 있다. 이 중 대한민국은 2030년까지 온실가스 배출전망치 (Business as Usual, BAU)인 8억 5,060만 톤 대비 37% 감축을 목표로 하고 있다.

Table 1 Major countries' NDC(Nationally Determined Contribution) for Paris Agreement
<<http://ebizdiary.tistory.com/513>>

Object Nation	감축목표	목표연도	기준연도	목표유형	국제탄소시장 사용여부
중국	60 ~ 65%	2030	2005	집약도	-
E.U.	40 %	2030	1990	절대량	X
러시아	25 ~ 30%	2030	1990	절대량	X
일본	26 %	2030	2013	절대량	O
대한민국	37 %	2030	-	BAU	O

배출을 저감시켜야하는 온실가스의 종류는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF_6)로 교토의정서(Kyoto Protocol, 1997)에서 규정되었으며, 파리협정(2015)에서도 동일하게 규정하였다. Table 2은 규정된 온실가스의 종류별 배출원과, 지구온난화지수, 온난화기여도 및 국내 배출량을 나타낸다. 지구온난화지수는 온실가스 1kg의 태양에너지 흡수량이며, 온실가스 중 이산화탄소 1kg의 흡수량을 1로 설정한 값이다. HFCs, PFCs, SF_6 는 CO_2 보다 지구온난화지수는 더 높지만, 온난화기여도와 국내 배출량을 고려하였을 때, 국내 배출량과 온난화기여도의 수치가 낮기 때문에, 지구온난화에 CO_2 가 타 온실가스보다 더 많은 영향을 미친다고 할 수 있다.

Table 2 Greenhouse gases & their contribution to global warming

<<https://gscaltexmediahub.com/energy/about-greenhouse-gas/>>

GHG Type	CO_2	CH_4	N_2O	HFCs, PFCs, SF_6
배출원	에너지 사용 /산업공정	폐기물/농업 /축산	산업공정 /비료사용	냉매 /세척용
지구온난화지수 ($\text{CO}_2 = 1$)	1	21	310	1,300 ~ 23,900
온난화기여도 (%)	55	15	6	24
국내 배출량 (%)	88.6	4.8	2.8	3.8

CO₂를 저감시키는 기술에는 CO₂ 배출을 저감시키는 기술과 공기 중에 배출된 CO₂를 저감시키는 기술이 있다. CO₂ 배출을 저감시키는 방법은 화석연료의 사용을 줄이거나, 이를 대체할 신재생에너지를 개발, 사용하여 배출량을 줄이는 방법과 배출구에 Filter 등을 장비시켜 CO₂의 배출을 줄이는 기술 등이 있다. 공기 중에 배출된 CO₂를 저감시키는 기술은 배출된 CO₂를 포집하여 저장하는 기술인 탄소 포집 및 저장(Carbon Captured and Storage, CCS) 기술과 포집 후 다른 물질로 변환하여 저장하는 탄소 포집 및 이용(Carbon Captured and Utilization, CCU) 기술이 있다. 이중 CCS는 다른 저감 기술에 비하여 CO₂를 대규모로 감축 가능한 장점이 있으며, 세계적으로 많은 Project가 수행되면서 안정적인 CO₂ 저감 기술로 알려져 있다. Fig. 2는 세계적으로 수행 중인 CCS Project를 보이고 있다.



Fig. 2 CCS projects worldwide
<<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2009/ee/b822107n>>

CCS의 CO₂를 저장(Storage/Sequestration)하는 방법은 Fig. 3와 같이 저장하는 공간의 위치로 분류된다. 육지에서 유전 및 천연가스 등의 자원을 채굴 후 발생한 공간에 CO₂를 저장하는 방법인 지중 저장(Geological Sequestration)법과 CO₂를 해양에 저장 혹은 용해시키는 방법인 해양 저장(Ocean Sequestration)법이 있다. 해양 저장법은 해양에 액체상의 CO₂를 용해시키는 방법인 용해법(Dissolution Type)과, 해양 지중에 저장하는 해양지중 저장법(Geological Sequestration under the Seafloor) 등이 있다. 이중 해양 직접 용해법은 CO₂가 해양환경에 미치는 영향의 불확실성으로 인하여 2007년 런던회의를 통하여 금지되었다.

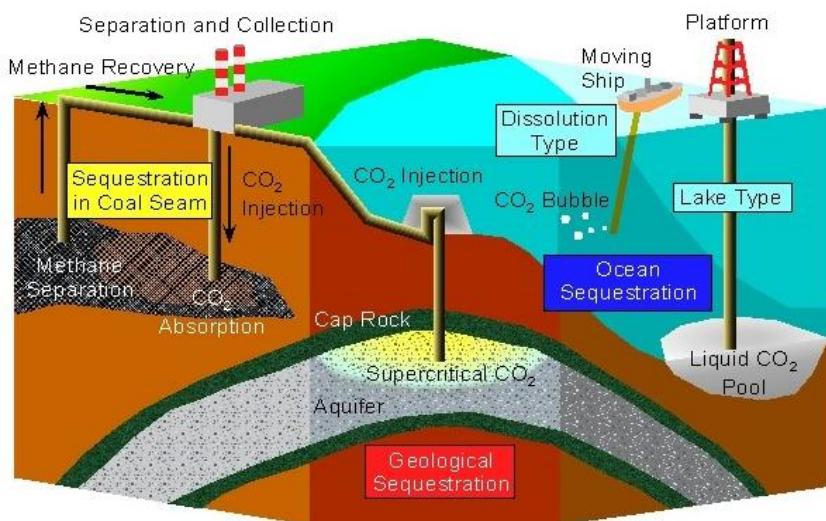


Fig. 3 Overview of CO₂ storage technologies

Kang & Huh(2008)은 다른 국가들의 CCS 연구 개발동향을 분석하여 국내 실용화 방안에 대하여 분석하였다. 그 결과, 우리나라의 경우는 지중저장법을 실행하기 위한 육상 공간이 부족하여 인근 해역에의 해양지중 저장법이 타당하다고 하였다.

해양지중 저장법을 통하여 CO₂를 저장하기 위해서는 공적 수용성(Public Acceptance) 확보가 필요하다. 이를 위해서는 지진 등의 재해 발생으로 저장 장소에 균열이 발생하여 해양지중에 저장된 CO₂가 해수로 누출되는 경우(Fig. 4), 누출된 CO₂가 주변 해양환경에 미치는 위험도 평가와 누출 지점에서 누출된 CO₂의 거동 모니터링 및 누출 후 해수로 용해된 CO₂의 해수중 대류 및 확산에 대한 예측과 이에 의한 주변 해양 환경에 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다.

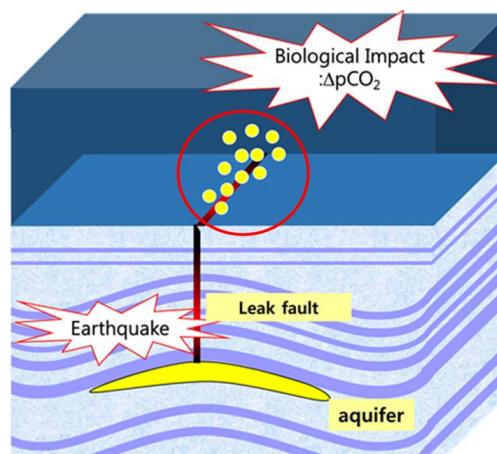


Fig. 4 Schematic view of CO₂ leakage

해수중 CO_2 는 주변 해수의 압력과 온도에 따라 액체 혹은 기체의 상으로 존재한다(Fig. 5). 따라서 주변 해양환경에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 누출 지점에서 누출된 기체상의 CO_2 기포의 상승 및 액체상의 해수 내에서의 거동과 해수로 용해 과정에 대한 예측, 해수에 용해된 CO_2 의 확산 및 대류에 대한 정확한 예측이 필요하다.

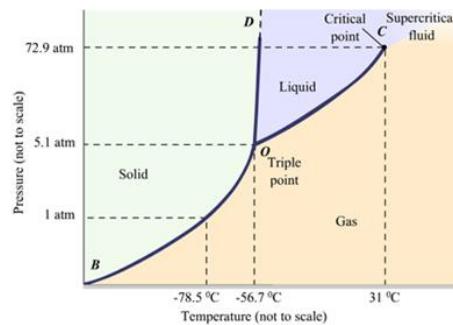


Fig. 5 Phase diagram of CO_2

또한 해수 중에서 CO_2 는 기체 상태인 기포(bubble)이나 액적(droplet) 상태로 존재하며 해수와 밀도 차이로 인하여 상승 또는 하강하며, 주변 해수에 상승 유동을 발생시킨다. 상승하는 CO_2 는 해수에 용해되며, 용해된 CO_2 로 인하여 해수의 밀도가 증가하고, 이로 발생하는 부력 차이로 인하여 하강 유동을 발생시킨다 (Fig. 6).

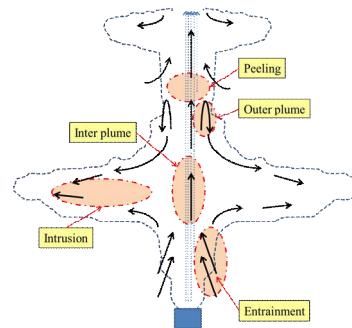


Fig. 6 Behavior of CO_2 bubble/droplet
in sea water

해수에 용해된 CO₂ 농도의 변화는 해양 생물 및 해양 환경에 영향을 미친다. Sato & Sato(2002)는 해수에 주입한 액체 CO₂에 따른 해수의 pH의 변화를 수치 시뮬레이션을 통하여 예측 및 Mortality Curve를 작성하여 해양환경영향평가를 수행하였고, Sato(2004)는 해양 난류 상에서 액체 CO₂를 직접 주입할 경우를 상정하여, 특정 동물성 플랑크톤의 생존성을 CO₂의 분압인 pCO₂의 변화량을 수치 해석을 통하여 예측하였으며, Kita(2006)는 해수중 CO₂ 누출시 pH보다 pCO₂의 변화량(ΔpCO_2)이 해양생태계에 악영향이 크며, 동물성 플랑크톤에 대한 실험을 통해 ΔpCO_2 가 5000ppm미만일 때 99.9%가 생존하여, 안전계수를 고려한 500ppm를 기준치로 제안한 바 있다(Fig. 7).

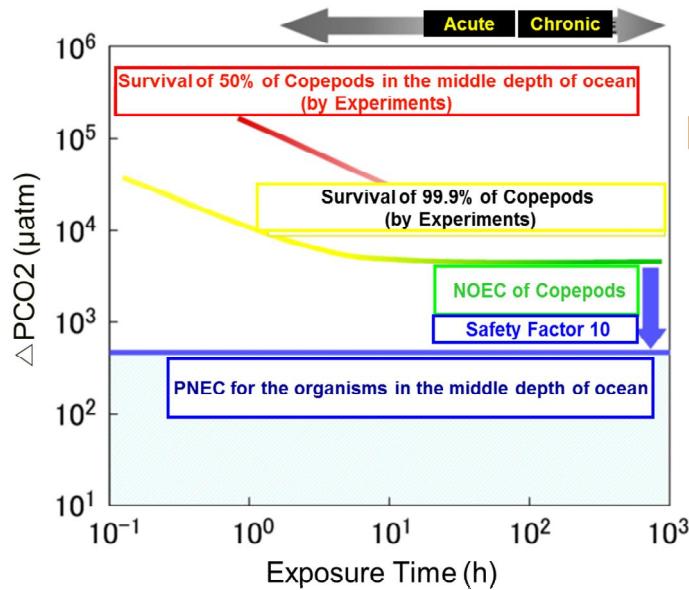


Fig. 7 Quantitative criteria for biological impacts by ΔpCO_2

제2절 관련 연구

관련된 해외의 연구 사례는 다음과 같다. 영국은 CO₂를 해양지중에 저장 후, 방출시켜 1년간 방출지점 주변의 CO₂ 변화 농도를 측정하는 QICS(Quantifying and Monitoring Environment Impacts of Geological Carbon Storage) Project를 진행하였으며, 일본은 Tomakomai 연안에 CO₂를 저장하며, 이에 대한 누출 모니터링을 진행 중에 있다. 수치 시뮬레이션을 이용한 연구로 Kano et al.(2009)는 일정하고 바닥이 평평한 소규모 영역에서 CO₂가 누출되는 경우의 CO₂ 기포의 누출, 용해 과정 및 용해된 CO₂의 확산 과정에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하고, 일본 해역에서 해양지중에 저장된 CO₂가 누출되는 경우에 대해 다중 규모 확산 시뮬레이션을 수행하여, 이에 대한 환경영향평가를 수행하였다(Kano et al., 2010). Mori et al.(2015)은 영국의 Ardmucknish 만에 CO₂를 저장하는 경우를 상정하여, 누출 발생 시의 시뮬레이션을 수행하였다.

국내 연구 사례의 경우, Hong et al.(2005)은 CO₂의 해양지중저장을 위한 대한민국에서의 기술 현황과 제도 및 해외의 동향을 분석하고, 우리나라의 저장 가능성을 검토하였다. 이를 통하여, 대한민국 연안 중 황해의 군산 분지, 남해의 제주 분지, 동해의 울릉 분지를 저장 후보 지역으로 제안하였으며(Fig. 8), 한국지질자원연구원에서는 2014년 이산화탄소 지중저장 실증을 위한 저장지층 특성화 및 기본설계 기술 개발에 대한 보고서를 포항분지를 대상으로 작성하였고, 정부는 2015년부터 연간 100만 톤의 CO₂를 저장할 계획을 검토하기 위한 프로젝트를 진행하고 있으며 2017년 1월부터 3월까지 포항 인근 지역에서 지질 탐사를 진행 후, CO₂ 약 100톤에 대한 주입 시험을 수행했지만, 2017년 11월에 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 인하여 프로젝트가 일시 중지되었다(Kwon, 2018).



Fig 8 Candidate sites for geological storage of CO₂ under sea floor
<<https://www.google.com/maps/>>

국내 수치 시뮬레이션을 이용한 연구로 Jeong et al.(2010)은 중해수층에 액체 CO₂를 직접 주입하여 용해시키는 방법인 해양용해법 수행 시 용해된 CO₂의 확산 및 대류와 환경영향 평가를 다중 규모 시뮬레이션을 통하여 예측하였으며, Choi et al.(2015)는 수치 모델링을 통한 포항분지에서 소규모 CO₂ 주입 실증 부지에 대해 CO₂ 주입 모사를 수행하였다. Kang et al.(2015)는 해양지중 저장 시 단층발생으로 단층 내에서의 누출과정에 대한 수치해석을 진행하였다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 국내에서는 CO₂ 해양지중저장법과 관련한 실험적 수치적 연구가 매우 미비하며, 이에 대한 연구가 필요하다.

제3절 연구 목적

본 논문에서는 해양지중에 저장된 CO₂가 해저면에서 해수층으로 누출되는 경우를 상정하여, 해수로 누출되는 기체상의 CO₂의 기포 상태로 상승 및 거동, CO₂가 해수 중으로 용해되는 과정과 해수에 용해된 CO₂의 대류 및 확산을 다중 규모 해양수치모델을 이용한 시뮬레이션을 수행하여 예측하고, 해양환경에 대한 영향을 정성적으로 추정하는 데 있다.

제2장 다중규모 해양수치모델

본 논문에서 사용한 수치해석 모델은 일본조선학회(Japan Society of Naval Architects and Oceans Engineers, JASANAOE) 산하 해양환경연구위원회(Marin Environmental Committee, MEC)에서 실제 해역의 해수유동 재현 및 해양환경영향 평가를 위한 목적으로 개발된 해양 모델인 MEC Ocean 모델을 기반으로 하고 있다. MEC Ocean 모델은 다중 규모 해양모델로, 수평 방향 속도를 계산한 후 수위를 통하여 압력을 계산하는 정수압 근사(Hydrostatic Approximation)을 적용시킨 중규모(Meso-scale, ~100km) 모델과, Full-3D 해석을 수행하는 근방역(Small-scale, ~1km) 모델을 단독 혹은 조합하여 조류 및 지형류 등의 해수 유동 및 환경을 재현하는 다중규모 해양수치모델(Muti-Scale Ocean model)이다.

MEC Ocean 모델을 사용한 연구는 아래와 같다. Mizumukai et al.(2007)은 MEC Ocean 모델을 이용하여 Ariake 해에서 산소결핍수(Oxygen-deficient water)의 유동에 대한 예측하였으며, Zhang & Kitazawa(2015)는 일본의 Gokasho 만에서 유기 폐기물의 확산에 대한 수치해석을 수행하였다. Lee et al.(2010)는 MEC Ocean 모델을 이용하여 속력시운전이 적합한 구간을 찾기 위해서 대마도 부근에서의 조류 시뮬레이션을 수행하였다.

제1절 MEC-CO₂ Model

본 논문에서 사용한 수치해석 모델은 MEC-CO₂ 모델(Kano et al., 2010)로, 누출 지점 근방역(Full-3D 해석 영역)에 Eulerian-Lagrangian 기법의 이상 유동(Two Phase Flow)의 방법인 해석기법을 적용하여, 누출되는 기체상 CO₂ 기포의 상승, 해수 중에서의 확산 및 용해 등의 거동과, 용해된 CO₂의 해수 중의 확산 및 유동을 예측한다.

다시 말해, Full 3D model 영역에서, 누출 지점에서 누출되는 분산상(Dispersed phase)인 기체 CO₂ 기포의 거동과 용해 과정은 Lagrangian Method으로 예측하며, 연속상(Continuous phase)인 해수의 유동과 해수 중에 용해된 CO₂의 대류 및 확산에 대한 해석은 Eulerian Method으로 예측한다. 후자의 경우는 중규모 영역 내에서의 해석법과 동일하다.

제2절 지배방정식

1. 중규모 영역: 정수압(Hydrostatic) 모델

사용된 수치해석 모델인 MEC-CO₂ 모델 중 중규모 영역에서의 지배방정식은 연속방정식(식 (1))과 정수압근사(식 (4))를 적용한 Navier-Stokes 방정식(식 (2)-식 (4))이다. 정수압 근사의 적용으로 압력 Poisson 방정식을 계산하지 않아 계산시간이 단축된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - gz = 0 \quad \because \frac{w}{(u, v)} \approx \frac{H}{L} \ll O(1) \quad (4)$$

여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도, f 는 Coriolis 계수, A_M 은 수평 방향 와점성 계수(Horizontal Eddy Viscosity Coefficient), K_M 은 수직 방향 와점성 계수(Vertical Eddy Viscosity Coefficient)으로 Richardson 수(식 (7))와 계수에 따른 Richardson 법칙(식 (5), (6))을 이용한다.

$$\frac{A_M}{A_{M0}} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{4/3} \quad (5)$$

$$\frac{K_M}{K_{M0}} = (1 + \beta_M Ri)^{\alpha_M} \quad (6)$$

$$Ri = - \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho_0 \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad (7)$$

여기서 D 는 계산격자의 크기이며, D_0 는 기준 격자의 크기이다. α_m 과 β_m 는 각

각 Webb(1970), Munk & Anderson(1948)의 값을 사용하였다.

식 (8) - 식(10)는 해수의 온도(T), 염분(S), 해수중 존재하는 CO_2 (Dissolved CO_2 , DCO_2)의 대류 확산 방정식이다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (10)$$

$$\frac{A_c}{A_{c0}} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{4/3} \quad (11)$$

$$\frac{K_c}{K_{c0}} = (1 + \beta_c Ri)^{\alpha_c} \quad (12)$$

여기서 A_c 는 수평 와확산 계수(Horizontal Eddy Diffusivity Coefficient), K_c 는 수직 와확산 계수(Vertical Eddy Diffusivity Coefficient)이다. A_c , K_c 는 각각 식 (11)과 식 (12)로부터 계산하며 α_c 는 Webb(1970), β_c 는 Munk & Anderson(1948)의 값을 사용하였다.

2. 근방역: Full 3D Lagrangian-Eulerian 모델

근방역에서는 영역 내의 해수의 유동과 CO₂의 거동을 정확히 예측하기 위해 누출점 근방역에 이상 유동(Two Phase Flow) 해석법 중 Eulerian-Lagrangian 기법을 적용하였다(Kano et al., 2009).

연속상(Continuous phase)인 해수의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c) = \frac{1}{V_{cell}} \sum_{n=1}^{n_d} \Gamma \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_d \rho_c \mathbf{u}_c) + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_c \mathbf{u}_c \mathbf{u}_c) + \frac{1}{V_{cell}} \sum_{n=1}^{n_d} \frac{D_d}{Dt}(\rho_d V_d \mathbf{u}_d) = -\nabla P + \nabla \cdot [\alpha_d \rho_c (v_c + v_t) d_c] \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c c_c T_c) + \nabla \cdot (\rho_c c_c T_c \mathbf{u}_c) = \nabla \cdot \left[\rho_c c_c (k + \frac{v_t}{Pr_t}) \nabla T_c \right] + \phi \quad (15)$$

$$d_c = \nabla \mathbf{u}_c + (\nabla \mathbf{u}_c)^T \quad (16)$$

$$\alpha_c + \alpha_d = 1 \quad (17)$$

$$\alpha_d = V_{cell}^{-1} \sum_{n=1}^{n_d} V_d \quad (18)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \rho_c v_c d_c : d_c \quad (19)$$

식 (13)은 Eulerian 관점에서의 연속방정식으로 Γ 는 기체상의 CO₂에서 해수로 용해되는 질량, α_c 는 격자 내 해수가 차지하는 비율, ρ_c 는 해수의 밀도, V_{cell} 는 격자의 체적, \mathbf{u}_c 는 해수의 속도, n_d 는 한 개의 격자 내에서 발생하는 총 기포의 수이다.

식 (14)는 해수의 운동량 보존 방정식으로, ρ_d 는 기체상의 CO₂의 밀도, P 는 압력이며, V_d 는 기체상의 CO₂의 체적, v_c 는 해수의 동점성 계수(Kinematic Viscosity)이며, v_t 는 와점성 계수(Eddy Viscosity)이다.

식 (15)은 해수의 에너지 보존 방정식으로 c_c 는 확산계수, Pr_t 는 난류 Prandtl Number이며, 식 (17)의 α_d 는 CO₂의 기포의 공극률(Void Rate)이다.

분산상(Dispersed phase)인 CO₂ 기포의 지배방정식인 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 식 (20)과 식 (21)에 나타내었다.

$$\frac{D_d}{Dt}(\rho_d V_d) = -\Gamma \quad (20)$$

$$\frac{D_d}{Dt}[(\rho_d + \beta\rho_c)V_d \mathbf{u}_d] = V_d[-\nabla P + (\rho_c - \rho_d)g - f_D - f_L] \quad (21)$$

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \frac{3}{2d_e} \rho_c |\mathbf{u}_r| \mathbf{u}_r \quad (22)$$

$$f_L = C_L \rho_c \mathbf{u}_r \times \omega_c \quad (23)$$

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_d - \mathbf{u}_c \quad (24)$$

$$\omega_c = \nabla \times \mathbf{u}_c \quad (25)$$

여기서 f_D , f_L 은 각각 CO₂ 기포에 작용하는 항력(Drag force)과 양력(Lift force)이다. β 는 CO₂ 기포의 부가질량의 계수이며, \mathbf{u}_d 는 CO₂ 기포의 속도, \mathbf{u}_r 은 해수와 CO₂ 기포의 상대속도이며, ω_c 는 CO₂ 기포의 와도(Vorticity)이다.

Full 3D 영역에서의 Eulerian 관점에서의 염분과 DCO₂의 대류 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c S) + u_c \nabla (\alpha_c S) = \nabla \left[\alpha_c (D_s + \frac{v_t}{Sc_t}) \nabla S \right] \quad (26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c C) + u_c \nabla (\alpha_c C) = \nabla \left[\alpha_c (D_c + \frac{v_t}{Sc_t}) \nabla C \right] + \frac{1}{V_{cell}} \sum_{n=1}^{n_d} \Gamma \quad (27)$$

$$\Gamma = \pi d_e^2 k (C_1 - C_{cell}) \quad (28)$$

여기서 Sc_t 은 난류 Schmidt Number, D_s , D_c 는 각각 염분과 DCO₂의 확산계수이며, d_e 는 누출되는 CO₂의 직경, C_1 은 CO₂ 기포의 표면, C_{cell} 은 격자 체적 내의 CO₂ 기포를 나타낸다.

제3장 수치 시뮬레이션

제1절 시뮬레이션 조건

1. 해석 영역

2017년 초기 포항 인근 해역에서는 약 100톤에 대한 주입시험이 진행되었지만, 같은 해에 발생한 포항 지진으로 인하여 잠시 중단되었다(Kwon, 2018). 이에 본 연구에서는 동해의 포항 인근 해역을 해석 영역으로 정하였다. 해석 영역에 대한 지형 data 중 육지 지형 Data는 US Geological Survey(USGS)의 GTOPO 30 data를, 해저 지형 data는 일본해양자료센터(Japan Oceanographic Data Center, JODC)의 Data를 사용하였다.

해석 영역은 경도는 $129^{\circ} \sim 131^{\circ}$, 위도 $35.1^{\circ} \sim 36.73^{\circ}$ 의 지역으로 수심은 약 2,200m(2.2km)이다. 수치 시뮬레이션의 계산 영역은 x, y 및 z 방향으로 각각 180km, 180km 및 2.2km이다. Fig. 9은 해석 영역의 지형의 위성사진과 전처리를 통하여 얻은 수치해석에 사용된 지형을 보이고 있다.

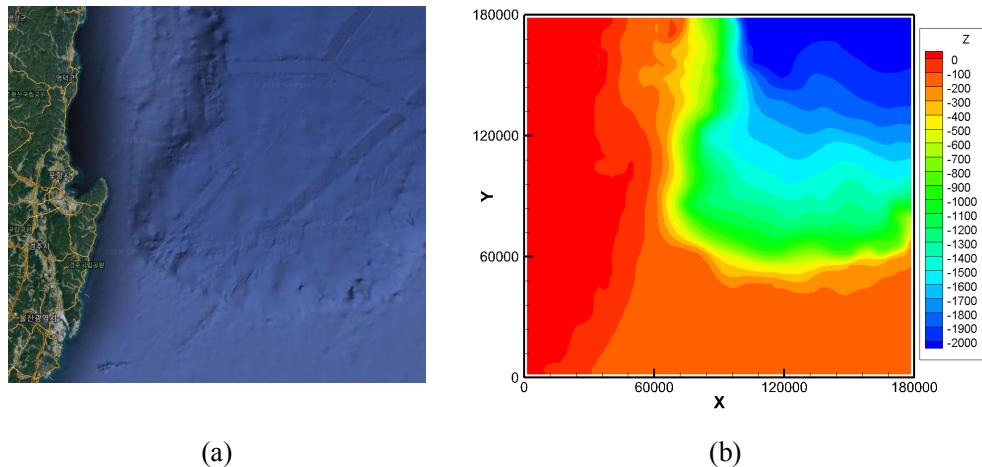


Fig. 9 Comparison between (a) satellite view and (b) topography data in top view

2. 격자계

가. 중규모 영역

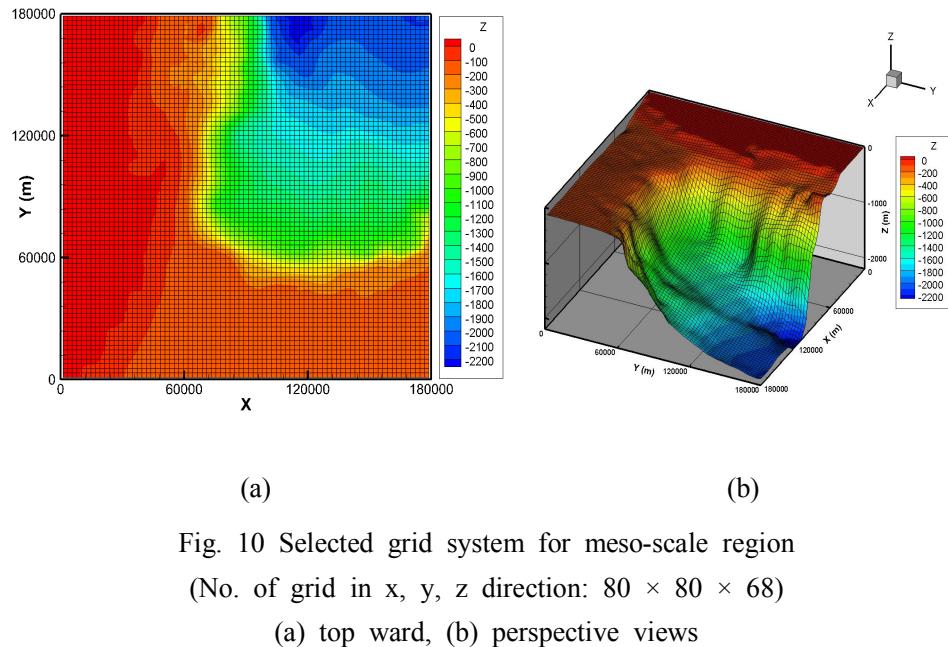
본 계산을 수행하기 위해 중규모 영역에 대한 격자 수렴도 테스트를 수행하였다. 수평방향 격자 크기와 개수를 다르게 설정하였고(Table 3), 모든 case에서 수직 방향 격자의 크기와 개수는 동일하게 설정하여(Table 4) 수행하였다(부록 A. 1 참조). 그 결과 중규모 영역에서의 격자를 case 7($80 \times 80 \times 68$, 435,200 개)로 사용하였다(Fig. 10).

Table 3 Cases for grid dependency test

\backslash	Number and sizes(dx) of horizontal(x, y direction) grids
case 1	20/ 9,000m
case 2	30/ 6,000m
case 3	40/ 4,500m
case 4	50/ 3,600m
case 5	60/ 3,000m
case 6	70/ 2,571m
case 7	80/ 2,250m
case 8	90/ 2,000m
case 9	100/ 1,800m

Table 4 Number of grids and sizes(dz) in z direction for grid dependency tests

Number of vertical grids	Grid number and water depth	Grid sizes(dz)
68	1 ~ 6 (2m ~ -10m)	2m
	7 ~ 49 (-10m ~ - 250m)	5m
	50 ~ 54 (- 250m ~ - 300m)	10m
	55 ~ 56 (- 300m ~ - 400m)	50m
	57 ~ 62 (- 400m ~ - 1,000m)	100m
	63 ~ 68 (- 1,000m ~ - 2,200m)	200m



나. 근방역
근방역 계산 영역은 중규모 영역의 한 개의 격자에 해당하며(Fig 11.), 격자 수는 $100 \times 100 \times 45$ 로 전체 450,000개이다($2,250\text{m} \times 2,250\text{m} \times 230\text{m}$). Fig. 12는 중규모 영역에서의 근방역의 위치를 표시한 것과 근방역의 격자에 대한 그림이다.

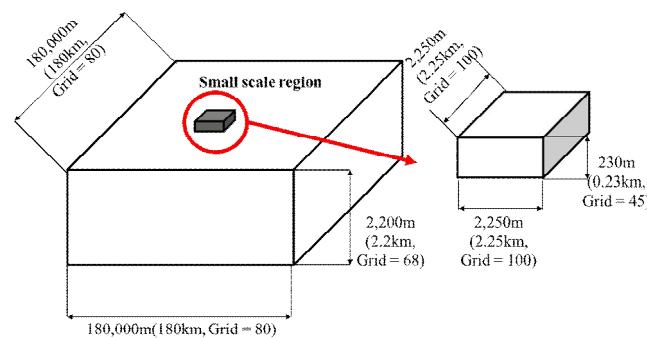


Fig. 11 Computed domain of small-scale region in
meso-scale region

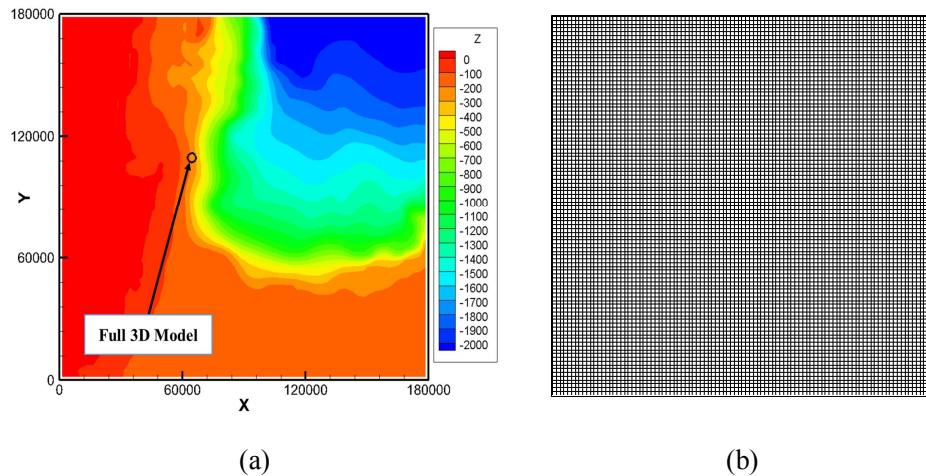


Fig. 12 Location of small-scale region in (a) meso-scale region and
(b) small-scale region grid

3. 경계 조건

MEC Ocean model은 개방형 경계에 조위나 조류의 속도를 부여하여, 해수 유동을 재현하며, MEC-CO₂ model도 동일하다. 본 연구에서는 해석 영역 내 유동 재현을 위해 개방역에 NAO-99jb의 조위 data(Matsumoto et al., 2000) 중 4가지 주요 조위 성분(Table 5)을 부여하여, 해수 유동을 재현하였고, Hino(1987)의 무반사 조건을 부여하였다.

Table 5 Tidal components for simulation

Tidal Type	O1	K1	M2	S2
Period	92,952sec (25.82h)	86,148sec (23.93h)	44,712sec (12.42h)	43,200sec (12h)

또한, 해저면과 해수면에서의 유속에 대해서 No-slip 조건을 적용하였고(식 (29), (30)), 온도, 염분, DCO₂은 모든 경계에서 Neumann 조건을 적용하였다(식 (31), 식 (32)).

$$u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + w = 0, \quad z = -H(x, y) \quad (29)$$

$$\tau_x = \gamma^2 \rho_0 u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \tau_y = \gamma^2 \rho_0 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (30)$$

$$K_h \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad K_S \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad K_c \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w, \quad z = \zeta(t, x, y) \quad (32)$$

$$\tau_x = C_D \rho_a U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_y = C_D \rho_a V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (33)$$

$$K_h \frac{\partial T}{\partial z} = Q_{heat}, \quad K_S \frac{\partial S}{\partial z} = Q_{salinity}, \quad K_c \frac{\partial C}{\partial z} = Q_{carbon} \quad (34)$$

τ_x, τ_y 은 해저에서의 수평방향 전단응력이며, γ 는 해저마찰계수이며, H 는 수심이다. K 는 온도, 염분, DCO₂의 수직 확산 계수(Vertical Diffusivity Coefficient)이다. τ_x, τ_y 은 해수면에서의 수평 방향의 전단응력이다. C_D 는 해면마찰계수이다. u, v 는 해저면에서의 속도이며, U, V 는 해수면에서의 속도이다.

4. 계산 조건

가. 온도, 염분, 해수 중 용해된 $\text{CO}_2(\text{DCO}_2)$ 초기조건

Hydrostatic model 영역에 사용된 Scalar 물리량은 우리나라의 얕을 수 있는 자료가 부족하여, 온도, 염분, DCO_2 의 초기조건은 수심에 따라 Fig. 13와 같이 (Kano et al., 2010) 부여 하였으며 수심 500m 이하의 물리량의 값은 500m와 동일하게 설정하였다.

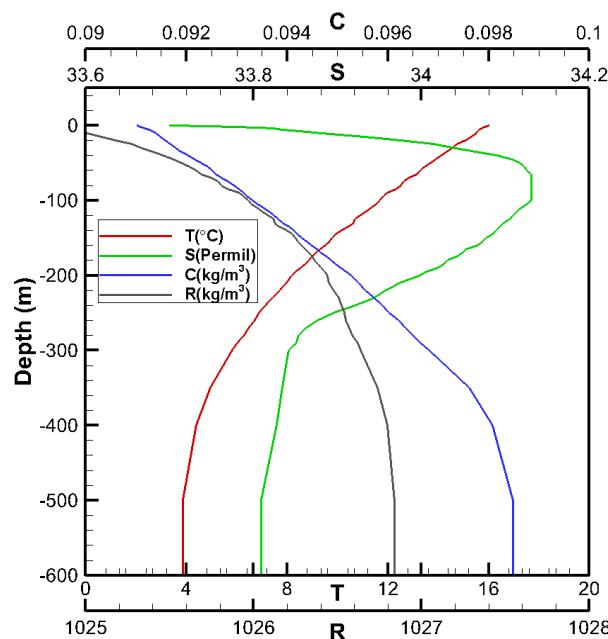


Fig. 13 Initial condition (temparature [T], salinity [S], dissolved CO_2 [DCO_2 , C], and density [R])

나. CO₂ 누출량, 누출 비율 및 누출 지점

근방역에서 균열이 발생하여 CO₂의 누출이 된다고 상정하였으며, 이때 누출량은 RITE(The Research Institute for Innovative Techonology for the Earth) 2004에서 가정한 양을 사용하였다. 누출 지점에서 해수에 용해된 CO₂와 CO₂ 기포의 초기 누출 비율을 달리하여 해석을 수행하였다(Table 6).

Table 6 Cases of leakage & initial CO₂ bubble ratio

	Leakage Amount	Initial CO ₂ bubble ratio
case 1	3,800ton/year	10%
case 2		50%
case 3		90%
case 4	94,600ton/year	10%
case 5		50%
case 6		90%

근방역 내의 누출 영역은 Fig. 14과 같이 가정하였다. 누출 면적 및 매 초당 CO₂ 누출량은 각각 $50,625\text{m}^2$, $5.9254 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 과 $2.3802 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 이다. 누출되는 기포의 직경은 2cm(0.02m, 반지름 1cm)를 설정하였다.

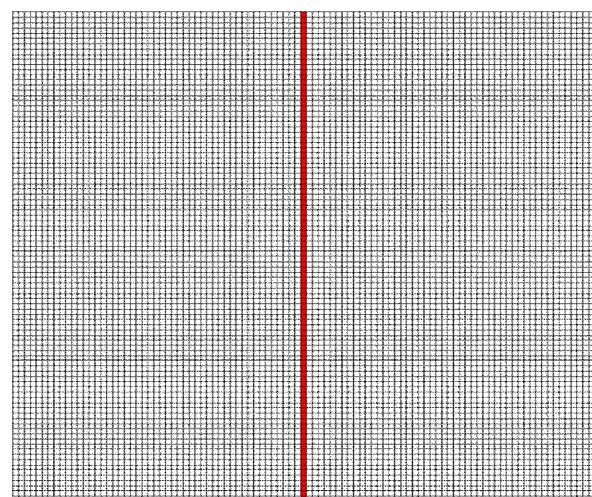


Fig. 14 Leakage area in small-scale region

다. 해석 parameter

Table 7은 중규모 영역의 계산과 근방역의 해석에 사용된 계수의 값을 나타낸 표이다.

수평 와점성 계수(Horizontal Eddy Viscosity)는 Fujino & Tabeta(1991)의 값인 $20m^2/s$ 를 사용하였으며, 수직 와점성 계수(Vertical Eddy Viscosity)는 $0.0001m^2/s$ 로 사용하였다. 마찰 계수는 0.0025를 사용하였으며, Coriolis 효과는 고려하지 않았다.

Table 7 Simulation parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Time step	1sec	Cloud	6.63
Air Density	$1.226kg/m^3$	Precipitation	$0.2743mm/h$
Water Density	$1025kg/m^3$	Vapor pressure	$26.86Pa$
Horizontal Eddy Viscosity	$20m^2/s$	Wind	$2.12m/s$
Vertical Eddy Viscosity	$1E-4m^2/s$	Air Temperature	$26.2^\circ C$
Horizontal Eddy Diffusivity	$10m^2/s$	Courant Number	0.5
Vertical Eddy Diffusivity	$1E-5m^2/s$	Diffusive Number	0.5
Frictional Coefficient	0.0025		
Coriolis Coefficient	0.0		

제2절 요약

본 장에서 수행한 연구 내용은 다음과 같다.

- 1) 2017년 CO₂ 해양지중저장 시험이 수행되었던 포항인근 육지 및 해역 (경도 129° ~ 131°, 위도 35.1° ~ 36.73°, 180km × 180km, 최대수심 2,200m)을 해석영역으로 선정하였다.
- 2) 해석 영역의 격자생성에 필요한 육지와 해저지형 정보는 각각 US Geological Survey(USGS)의 GTOPO 30 데이터와 일본해양자료센터(Japan Oceanographic Data Center, JODC)의 데이터를 수집하여 사용하였다.
- 3) 해석 영역 내 해수유동 재현을 위한 경계조건 부여 및 재현결과 비교를 위해 필요한 조위성분은 NAO-99jb(Matsumoto et al., 2000)와 국립해양조사원(Korea Hydrographic Oceanographic Agency, KHOA)의 데이터를 이용하였다.
- 4) 수집한 조위 성분중 해수유동에 큰 영향을 주는 4개의 분조(O1, K1, M2 & S2)를 선정하였고, 이 4개 분조의 조위성분을 조합하여 개방역의 조위 경계조건으로 사용하였다.
- 5) 기포 CO₂의 용해율 및 국부유동에 영향을 미치는 온도/해수밀도/DCO₂의 초기조건 설정을 위하여 관련 데이터를 조사하였으나, 국내 관련 데이터가 부족하여 Kano et al.(2010)의 연구에서 사용한 분포를 초기조건으로 부여하였다.
- 6) 수평방향 격자수를 변화시켜 중규모영역 단독 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 조위(수위)와 계측값을 비교하여, 중규모영역의 최적 격자수를 찾았다. (부록 A.1 참조)

- 7) 해석영역 내 수심 230m 해저면에 지진 등으로 길이 및 폭이 각각 2,250m 와 22.5m(면적 50,625m²)인 균열이 발생한 경우를 상정하였다.
- 8) 균열부를 통해서 해수로 누출되는 기포 CO₂의 량은 연간 3,800톤과 94,600톤의 두 가지 조건을, 누출지점에서의 초기 기포 CO₂의 비율은 10%, 50%와 90%의 세 가지 조건을 가정하여 총 여섯 가지의 시뮬레이션을 수행하였다.

제4장 수치 시뮬레이션 결과

제1절 조위 비교

조위 비교를 Fig. 15의 점선 내부의 지역(Point 7, 9)은 국립해양조사원(Korea Hydrographic Oceanographic Agency, KHOA)의 data와 NAO-99jb의 data 그리고 시뮬레이션 결과를, 이 외의 영역은 NAO-99jb의 data와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

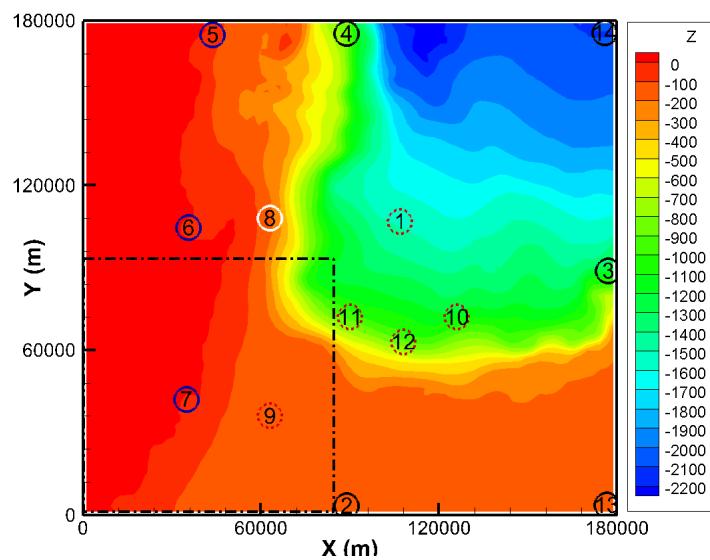


Fig. 15 Locations of tidal level comparison

계산결과 영역의 중심을 제외한 영역에서 진폭과 위상이 정성적으로 일치한다(Fig. 16 ~ 29).

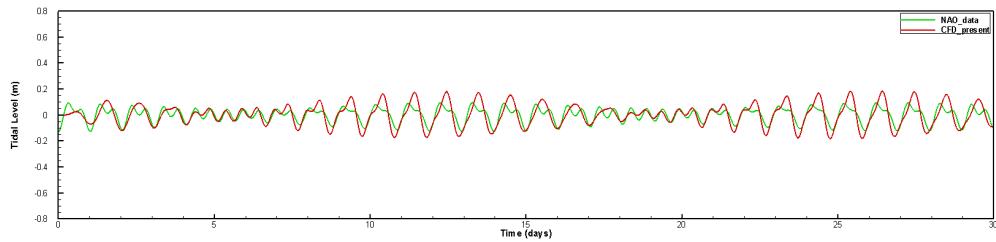


Fig. 16 Comparison of tidal level at north boundary(No. 4)

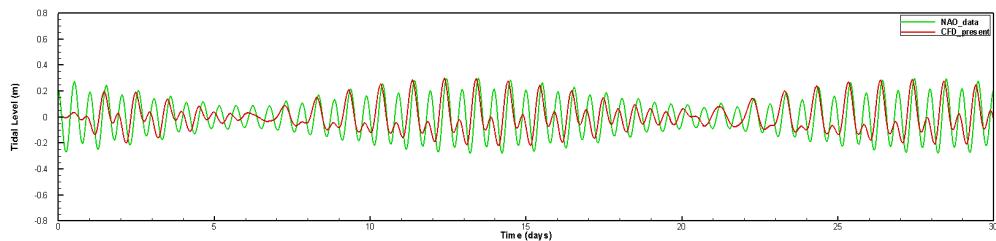


Fig. 17 Comparison of tidal level at south boundary(No. 2)

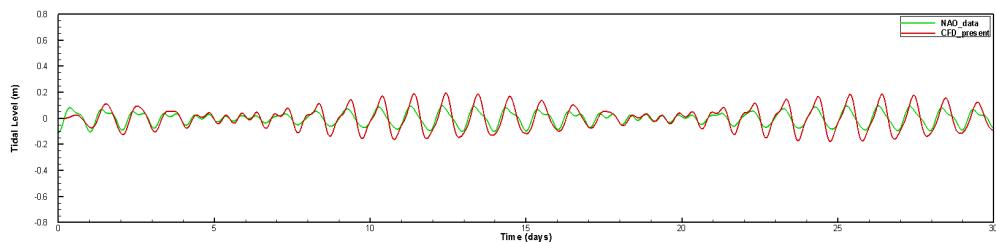


Fig. 18 Comparison of tidal level at east boundary(No. 3)

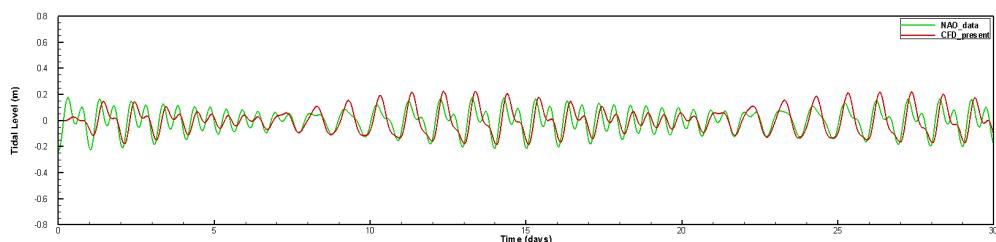


Fig. 19 Comparison of tidal level at southeast boundary(No. 13)

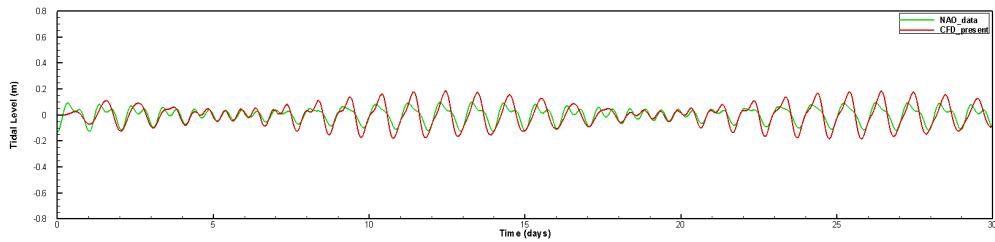


Fig. 20 Comparison of tidal level at northeast boundary(No. 14)

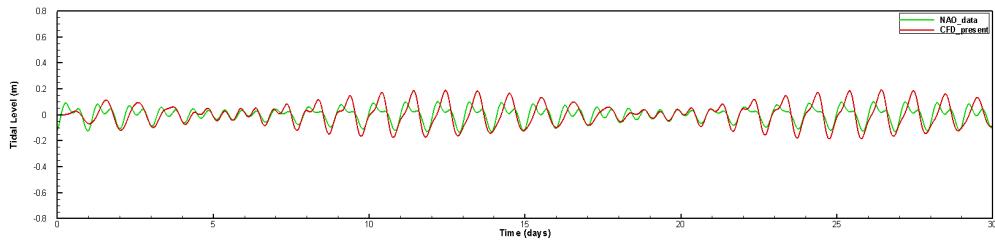


Fig. 21 Comparison of tidal level near land area 1(No. 5)

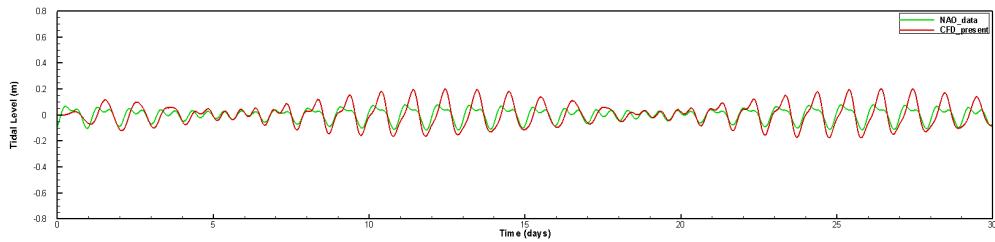


Fig. 22 Comparison of tidal level near land area 2(No. 6)

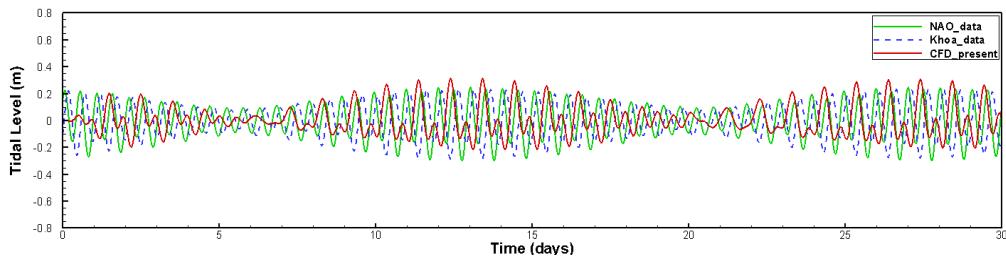


Fig. 23 Comparison of tidal level near land area 3(No. 7)

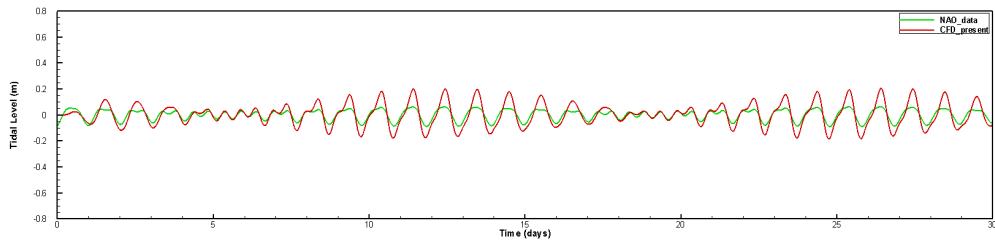


Fig. 24 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 1)

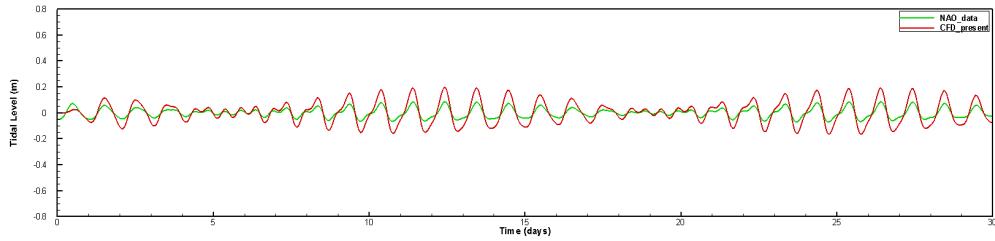


Fig. 25 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 10)

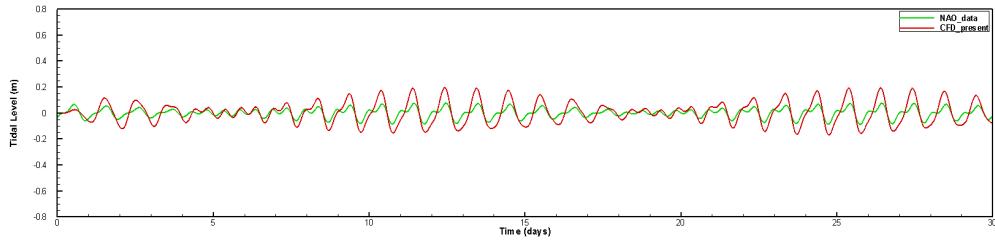


Fig. 26 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 11)

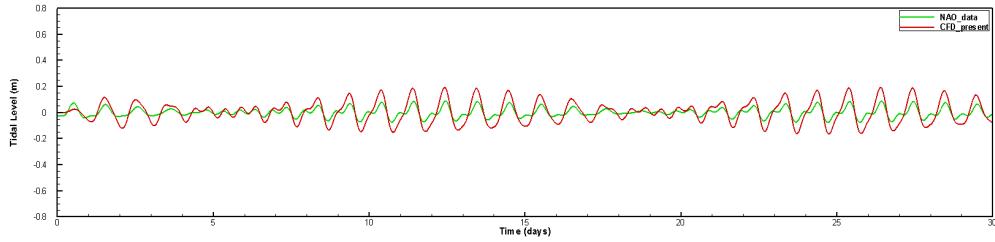


Fig. 27 Comparison of tidal level in the central area of simulation domain(No. 12)

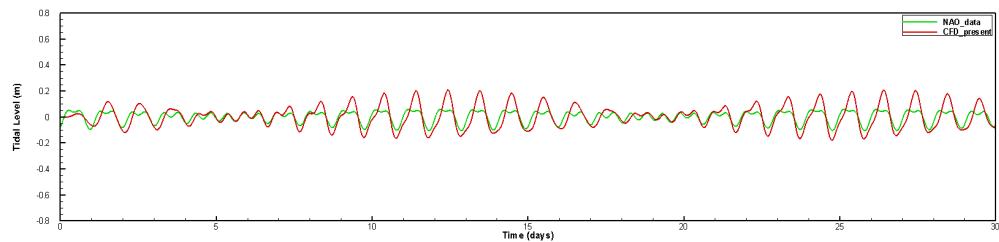


Fig. 28 Comparison of tidal level at leakage point(No. 8)

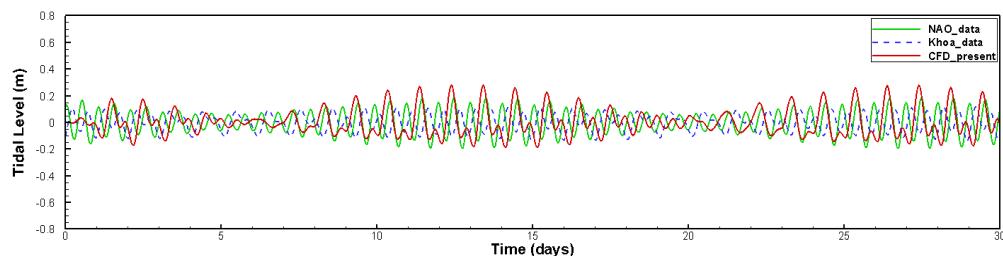


Fig. 29 Comparison of tidal level in the southwest area of simulation domain(No. 9)

제2절 근방역

Fig. 30과 31은 근방역에서 CO_2 기포가 해수 중에 차지하는 비율인 공극률(Void rate)을 각 case별 CO_2 누출 30일 후 누출점을 포함하는 xz 단면($y= 1,125\text{m}$)과 yz 단면($x= 1,125\text{m}$)에서 나타낸 그림이다. CO_2 기포 비율이 높을수록 누출점 인근에 CO_2 기포가 많은 것이 보이며, 모든 case에서 수심 100m 이하에서 CO_2 기포가 용해되는 것으로 보인다.

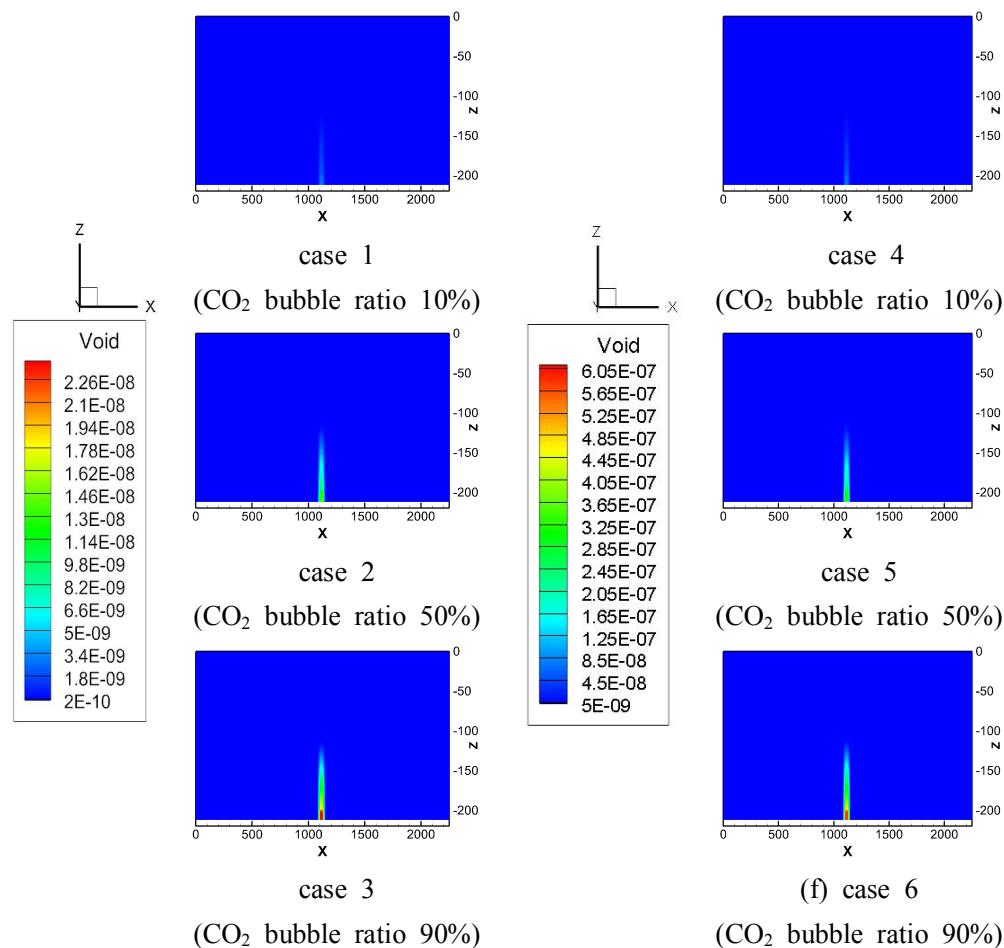


Fig. 30 Comparison contour maps of void rate including leakage point in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) after 30 days of CO_2 leakage with the different leakage amount in small scale region ((left): 3,800ton/year, (right): 94,600ton/year)

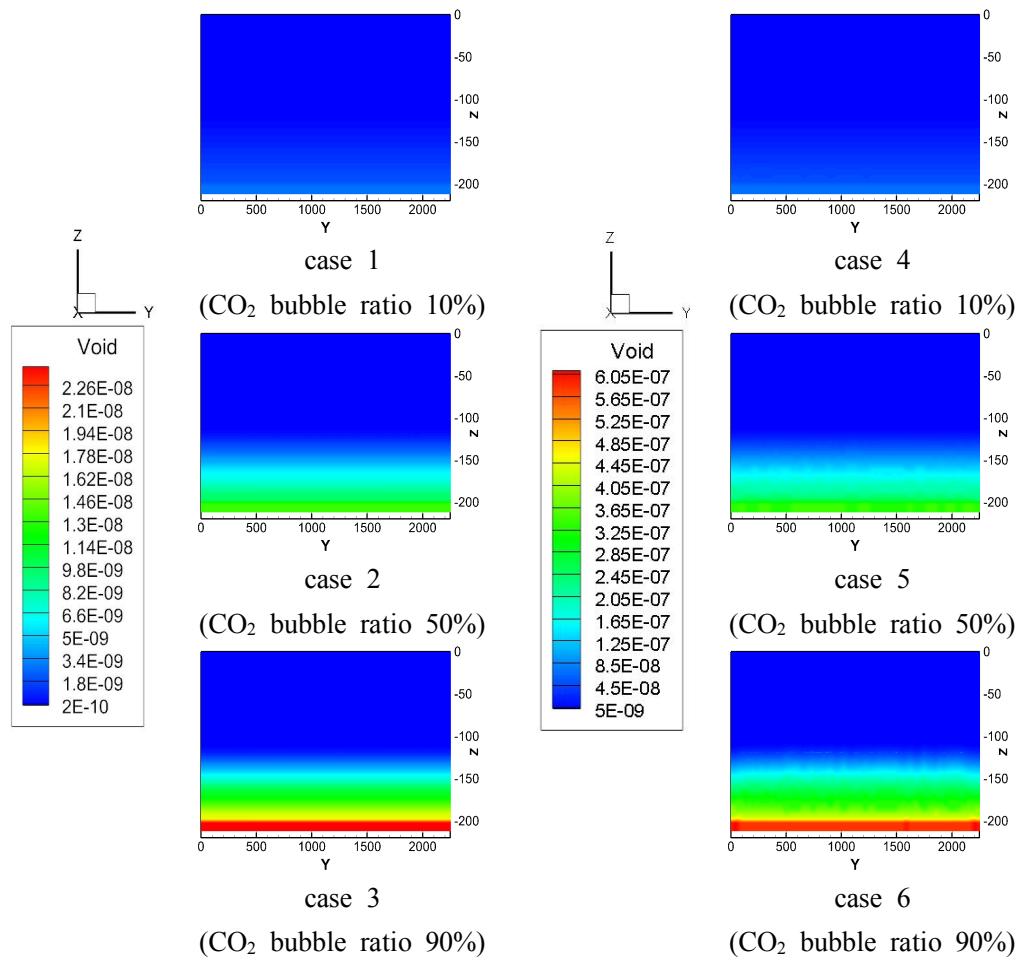


Fig. 31 Comparison contour maps of void rate including leakage point in yz-plane(x= 1,125m) after 30 days of CO₂ leakage with the different leakage amount in small scale region ((left): 3,800ton/year, (right): 94,600ton/year)

Fig. 32은 근방역에서 CO_2 기포 비율이 10%이며 누출량이 적은(연간 3,800 톤) case 1과 누출량이 많은(연간 94,600 톤) case 4의 CO_2 누출 30일 후 누출점을 포함한 xz 단면($y= 1,125\text{m}$)과 yz 단면($x= 1,125\text{m}$)에서 ΔDCO_2 의 변화량(ΔDCO_2 , dC)변화량을 그린 그림이다. 누출량이 적은 case 1은 case 4에 비하여 누출량이 약 25배 적기 때문에, 비교적 적은 변화를 볼 수 있다.

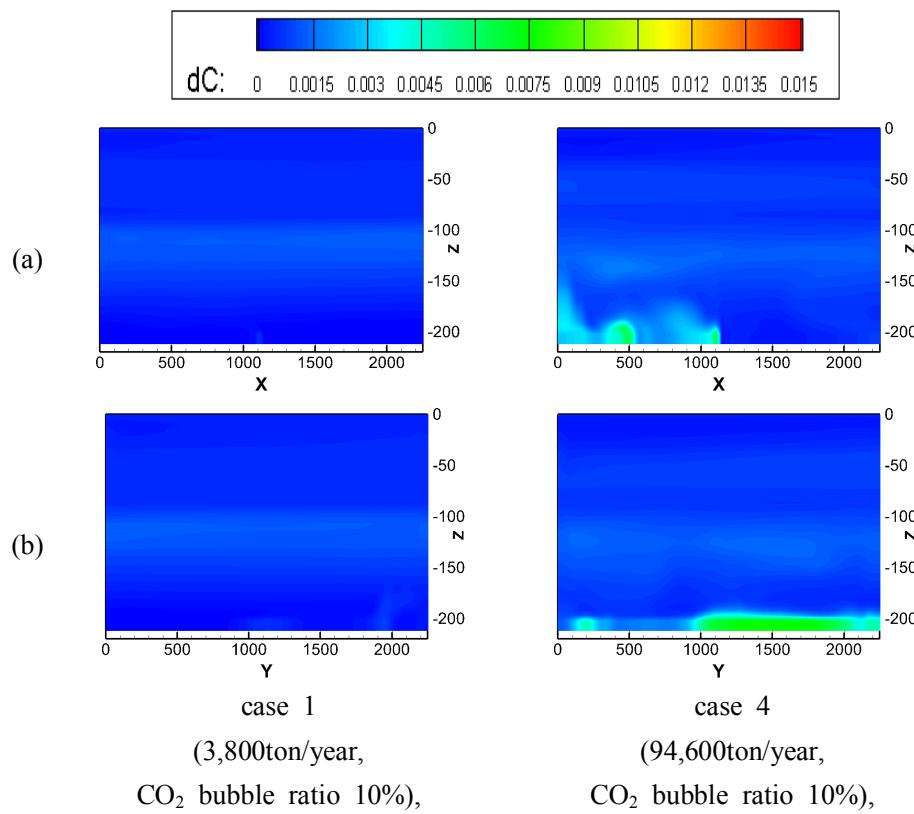


Fig. 32 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point after 30 days of CO_2 leakage with the different leakage amount in small scale region((a) : xz-plane($y= 1,125\text{m}$), (b) : yz-plane($x= 1,125\text{m}$))

Fig. 33은 근방역에서 CO₂ 기포 비율이 10%이며 누출량이 적은(3,800ton/year) case 1과 누출량이 많은(94,600ton/year) case 4의 CO₂ 누출 30일 후 누출점을 포함한 xz 단면(y= 1,125m)과 yz 단면(x= 1,125m)에서 pCO₂의 변화량(ΔpCO_2 , dpCO₂)를 그린 그림이다.

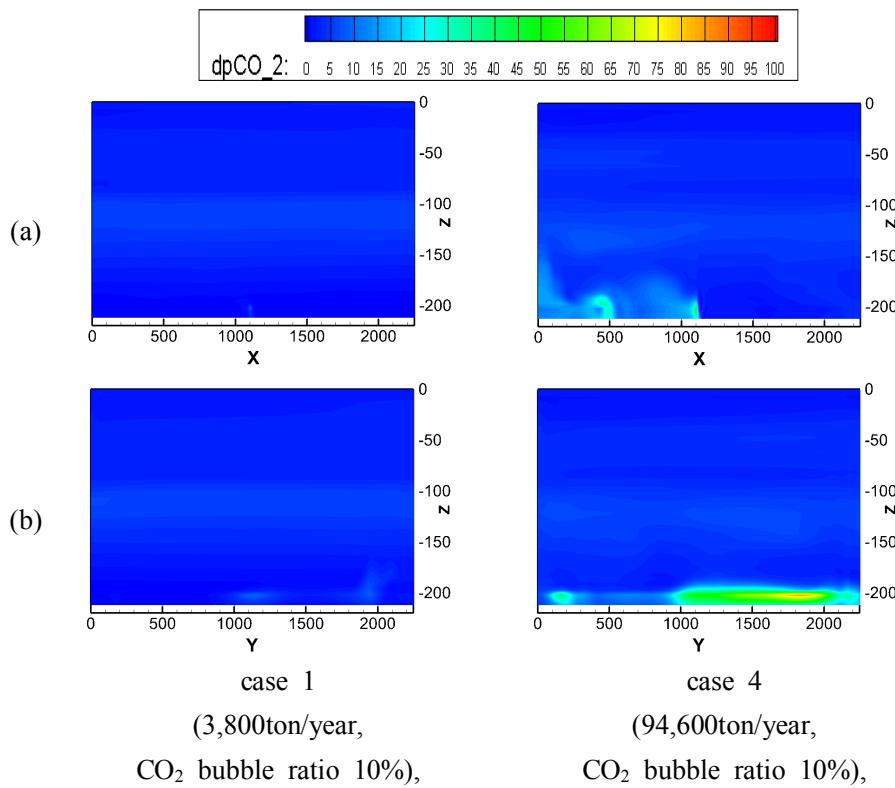


Fig. 33 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point after 30 days of CO₂ leakage with the different leakage amount in small scale region((a) : xz-plane(y= 1,125m), (b) : yz-plane(x= 1,125m))

Fig. 34과 35은 근방역에서 연간 94,600톤CO₂가 누출되며, CO₂ 기포 비율이 10%인 case 4와 비율이 90%인 case 6의 누출점을 포함한 xz 단면($y= 1,125\text{m}$)과 yz 단면($x= 1,125\text{m}$)에서 DCO₂의 변화량(ΔDCO_2 , dC)를 10일 간격으로 그린 그림이다. CO₂ 기포 비율이 높은 case 6은 기포 비율이 낮은 case 4에 비하여 ΔDCO_2 가 비교적 높게 상승하며, 누출점 인근에서는 ΔDCO_2 가 case 4에 비하여 낮은 것을 볼 수 있다.

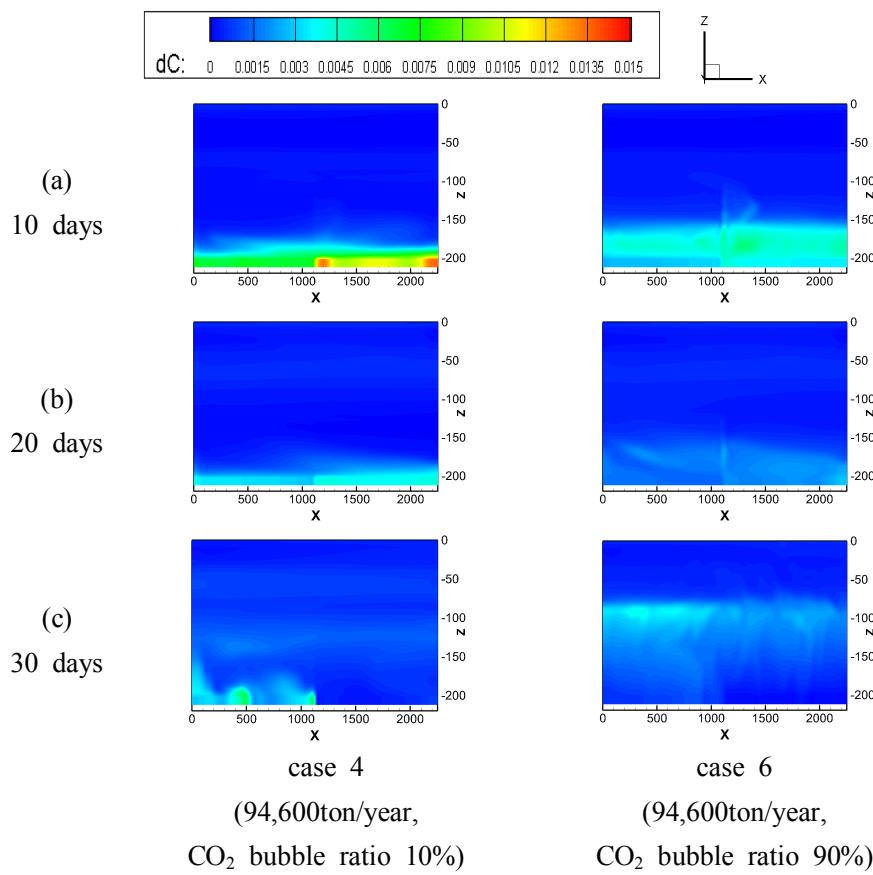


Fig. 34 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) with the different CO₂ bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage

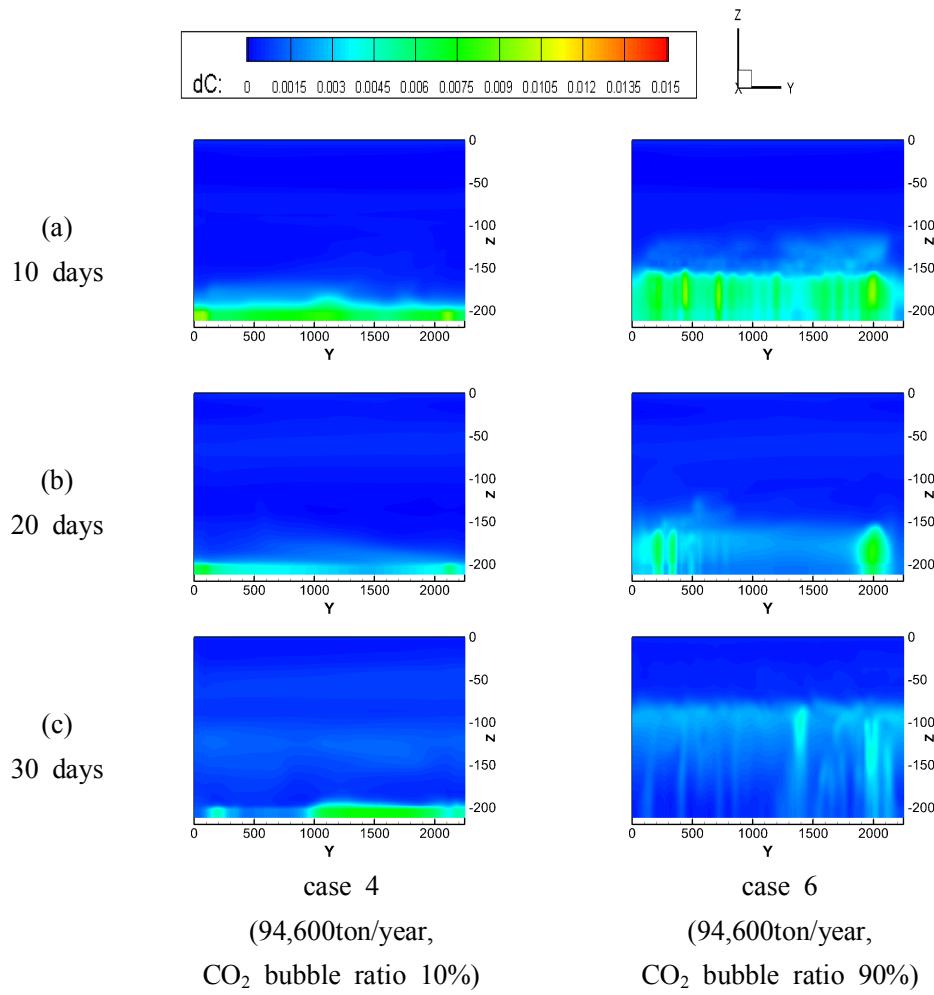


Fig. 35 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125m$) with the different CO_2 bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO_2 leakage

Fig. 36과 37는 근방역에서 연간 94,600톤의 CO₂가 누출되며, CO₂ 기포 비율이 10%인 case 4와 비율이 90%인 case 6의 누출점을 포함한 xz 단면($y= 1,125\text{m}$)과 yz 단면($x= 1,125\text{m}$)에서 pCO₂의 변화량(ΔpCO_2 , dpCO_2)을 10일 간격으로 그린 그림이다. 두 case 모두 DCO₂의 변화량과 유사한 경향을 보이고 있으며, 최대값이 500ppm을 넘지 않는 것을 볼 수 있다.

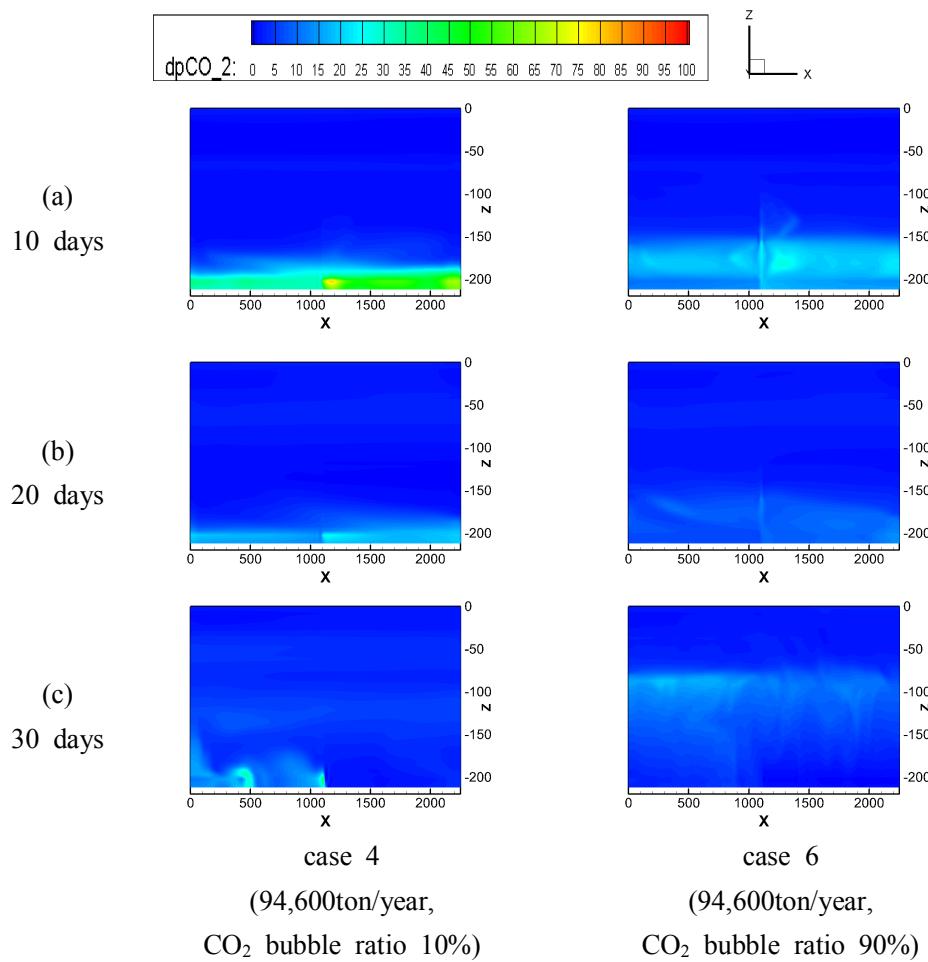


Fig. 36 Comparison contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in xz-plane($y = 1,125m$) with the different CO_2 bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO_2 leakage

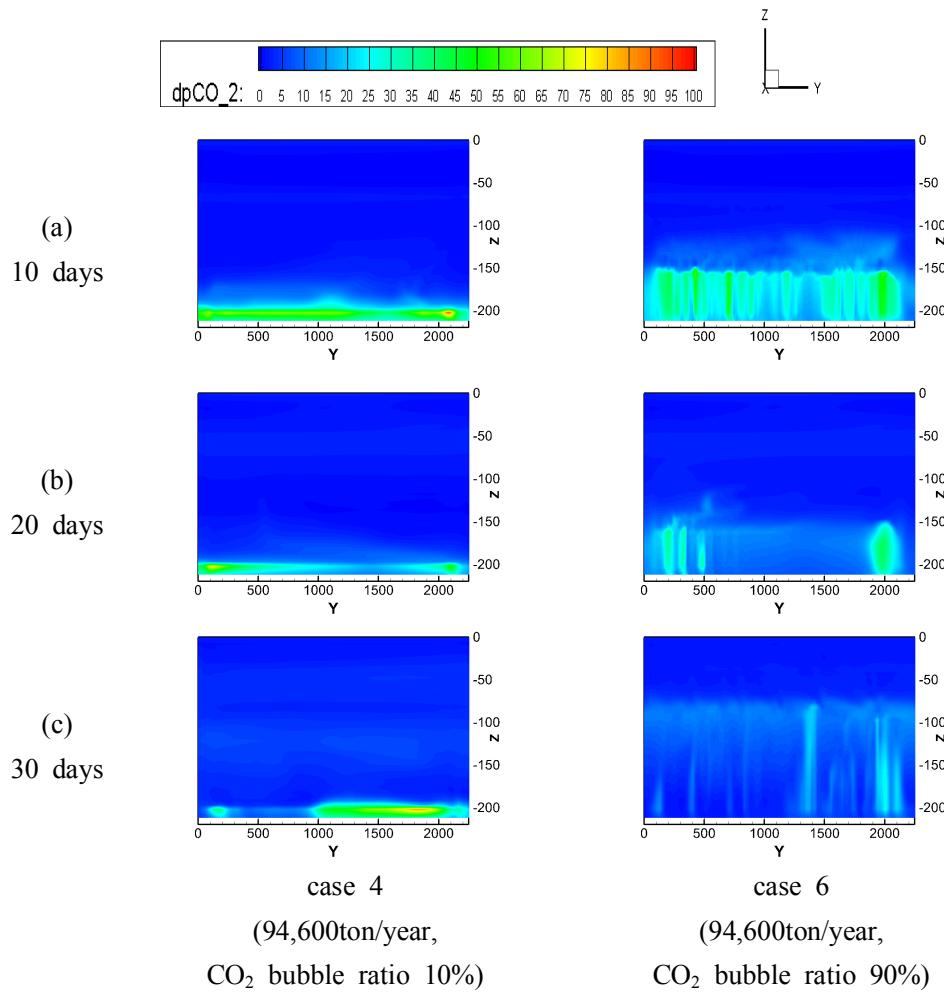


Fig. 37 Comparison contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point in yz-plane(x= 1,125m) with the different CO₂ bubble ratio in small-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage

다른 case 2, case 3, case 5는 부록에 5일의 간격으로 비교 가능하도록 수록하였다(부록 A.2, A.3 참조).

제3절 중규모 영역

Fig. 38은 중규모 영역에서 CO_2 기포 비율이 10%이며 누출량이 적은(3,800ton/year) case 1과 누출량이 많은(94,600ton/year) case 4의 CO_2 누출 30일 후 누출점을 포함한 xz 단면($y= 108,000\text{m}$)과 yz 단면($x= 63,000\text{m}$)에서 ΔDCO_2 의 변화량(ΔDCO_2 , dC) 그림이다. 누출량이 적은 case 1의 ΔDCO_2 는 누출량이 많은 case 4와 비교하여 적은 변화를 보인다.

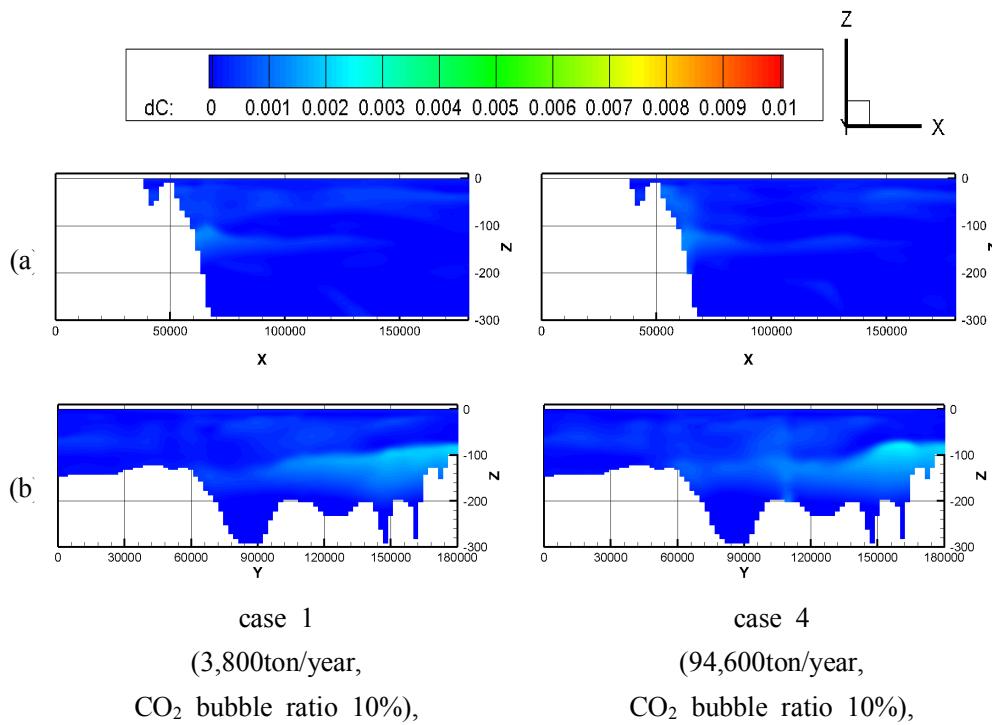


Fig. 38 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point after 30 days of CO_2 leakage with the different leakage amount in meso-scale region((a) : xz-plane($y= 108,000\text{m}$), (b) : yz-plane($x= 63,000\text{m}$))

Fig. 39은 중규모 영역에서 CO_2 의 기포 비율이 10%이며 누출량이 적은 (3,800ton/year) case 1과 누출량이 많은(94,600ton/year) case 4의 CO_2 누출 30일 후 누출점을 포함한 xz 단면($y= 108,000\text{m}$)과 yz 단면($x= 63,000\text{m}$)에서 $p\text{CO}_2$ 의 변화량($\Delta p\text{CO}_2$, dpCO_2)을 그린 그림이다.

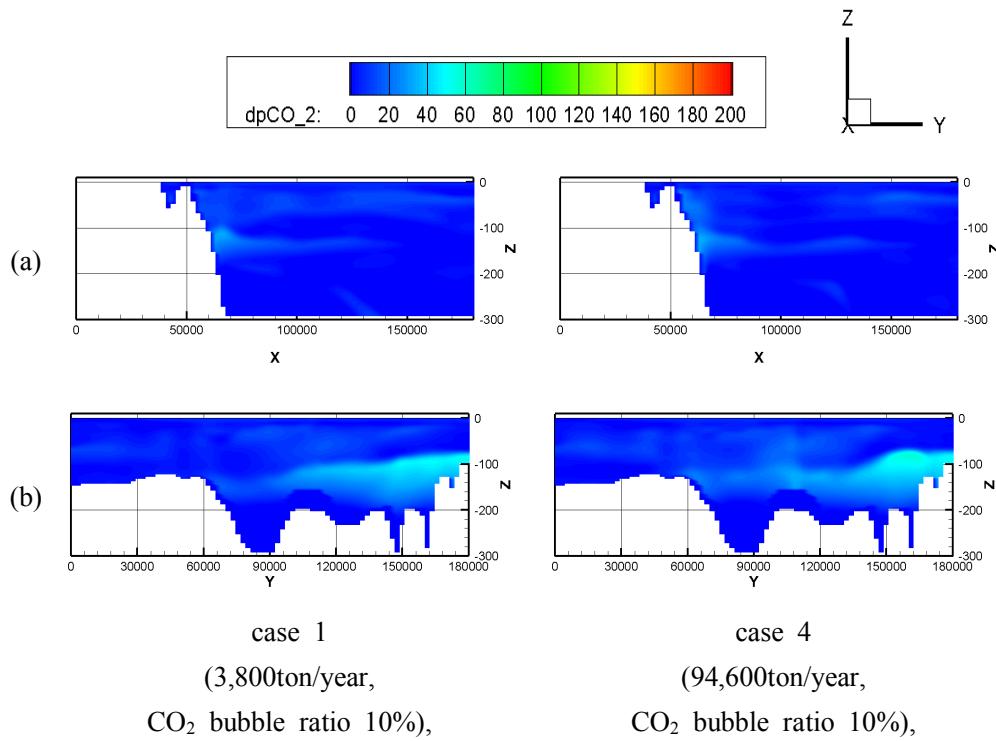


Fig. 39 Comparison contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point after 30 days of CO_2 leakage with the different leakage amount in meso-scale region((a) : xz-plane($y= 108,000\text{m}$), (b) : yz-plane($x= 63,000\text{m}$))

Fig. 40과 41은 중규모 영역에서 연간 94,600톤의 CO₂가 누출되며, CO₂ 기포 비율이 10%인 case 4와 비율이 90%인 case 6의 누출점을 포함한 xz 단면($y=108,000\text{m}$)과 yz 단면($x=63,000\text{m}$)에서 DCO₂의 변화량(ΔDCO_2 , dC)을 10일 간격으로 그린 그림이다.

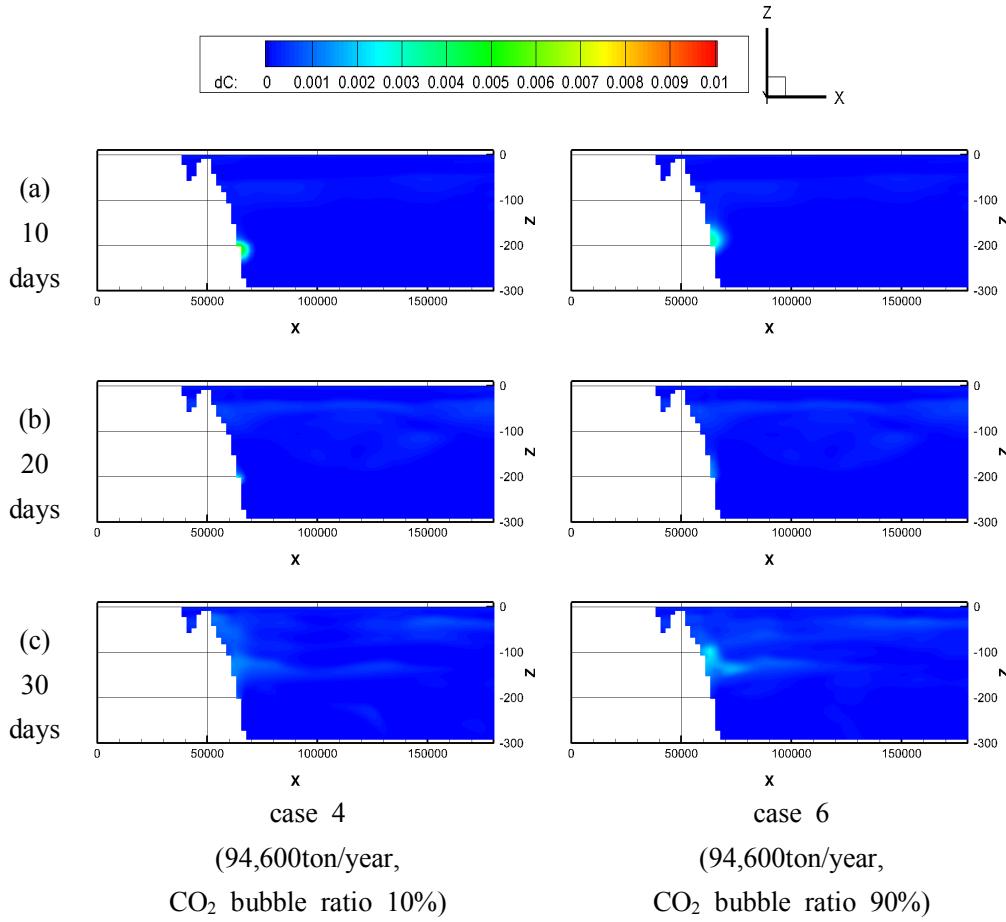


Fig. 40 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in xz-plane($y=108,000\text{m}$) with the different CO₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage

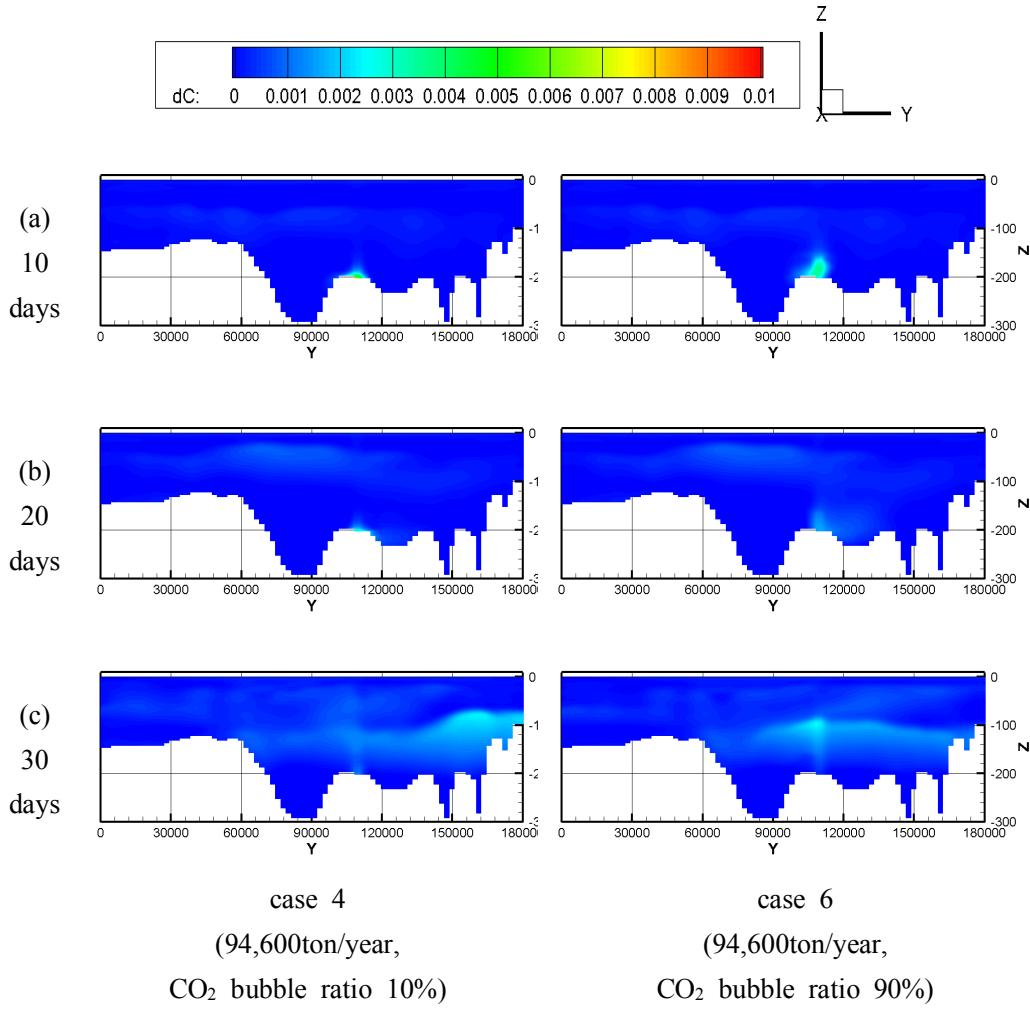


Fig. 41 Comparison contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane(x= 63,000m) with the different CO₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage

Fig. 42과 43은 중규모 영역에서 연간 94,600톤의 CO₂가 누출되며, CO₂ 기포 비율이 10%인 case 4와 비율이 90%인 case 6의 누출점을 포함한 xz 단면($y=108,000\text{m}$)과 yz 단면($x=63,000\text{m}$)에서 pCO₂의 변화량($\Delta p\text{CO}_2$, dpCO_2)을 10일 간격으로 그린 그림이다. ΔDCO_2 와 유사한 경향을 보이고 있으며 $\Delta p\text{CO}_2$ 의 최대 값이 500ppm을 넘지 않는 것을 볼 수 있다.

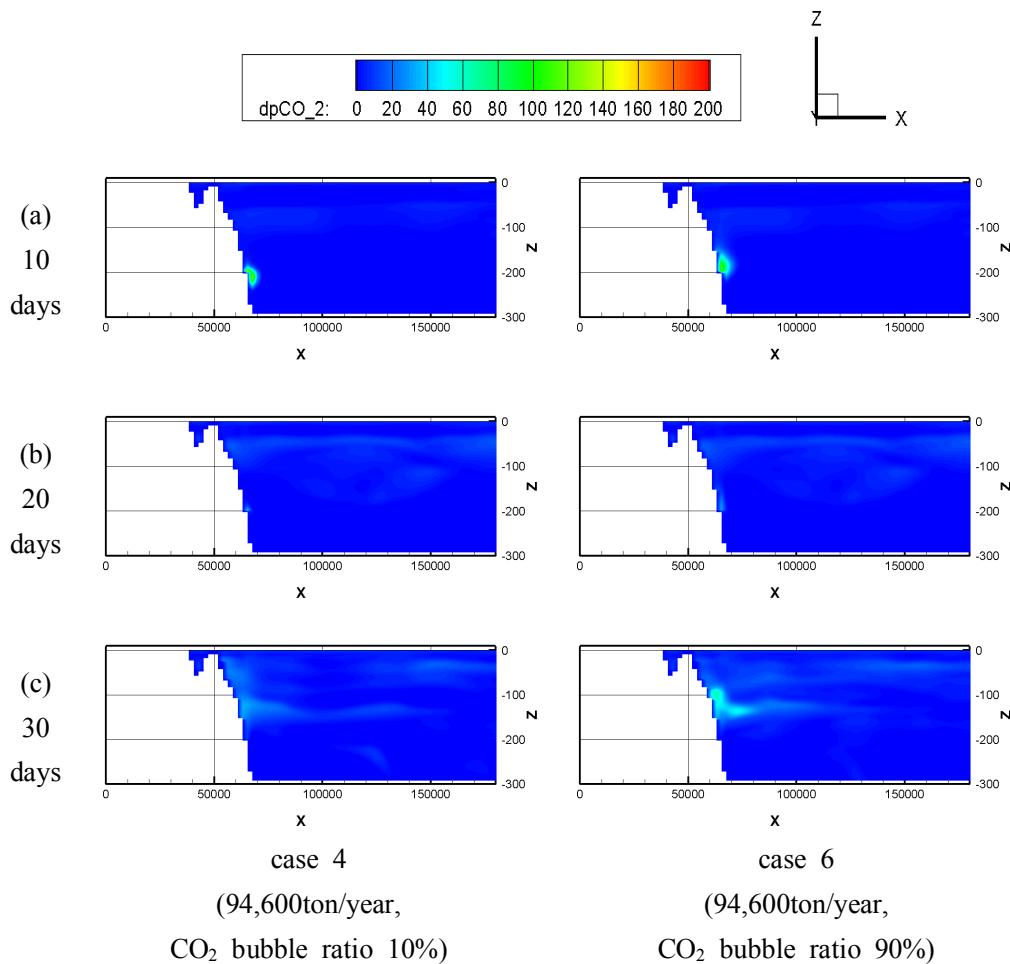


Fig. 42 Comparison contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point in xz-plane($y=108,000\text{m}$) with the different CO₂ bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO₂ leakage

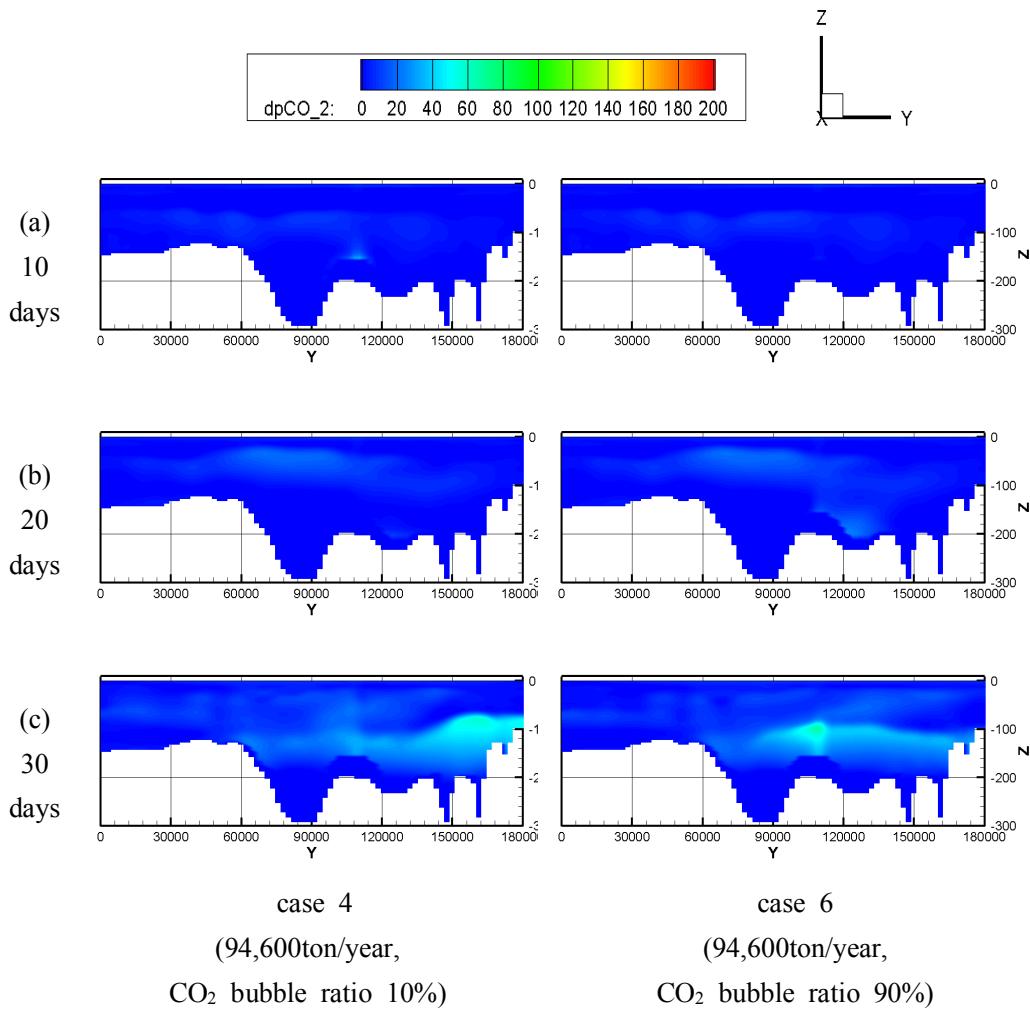


Fig. 43 Comparison contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) with the different CO_2 bubble ratio in meso-scale region after (a) 10, (b) 20 and (c) 30 days of CO_2 leakage

비교하지 않은 case 2, case 3, case 5는 부록에 5일의 간격으로 비교 가능하도록 수록하였다(부록 A.4, A.5 참조).

제4절 결과 요약

포항인근 해양지중에 저장된 CO₂가 수심 230m, 길이 및 폭이 각각 2,250m과 22.5m(면적 50,625m²)인 균열부를 통해 해저면에서 해수층으로 누출되는 경우를 상정하여, 다중규모 해양수치모델을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 케이스는 두 가지의 누출량(연간 3,800톤 및 94,6000톤) 조건과 세 가지의 초기 기포 CO₂ 비율(10%, 50% 및 90%)을 조합하여 총 여섯 가지이며, 누출 후 30일까지의 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 분석, 상대비교 하였다.

주요 해석 결과는 다음과 같다.

- 1) 해수유동 재현성의 정확도 확인을 위해, 시뮬레이션을 통해서 얻어진 조위(수위)를 국립해양조사원과 NAO-99jb의 분조 성분을 이용해 얻은 조위와 비교한 결과, 해석영역의 중심부를 제외하고 진폭과 위상이 일치하였다. 중심부에서의 조위차이는 3면의 개방역에 부여한 조위 및 무반사 경계조건의 중첩 현상과 해저 및 육지 지형에서 발생하는 지형류 등의 영향으로 판단된다.
- 2) 근방역내의 공극률의 시간에 의한 변화를 보면, 기포 CO₂는 누출량 및 초기 기포비율에 상관없이 수직방향으로 주로 이동한다. 또한, 초기 기포 비율에 따라 최대 상승 높이의 차이가 나지만, 해석한 모든 케이스에서 누출된 CO₂ 기포는 수면에 도달하기 전에 모두 해수에 용해되는 것으로 예측되었다.
- 3) 해수중 용해된 DCO₂의 근방역 내에서의 거동은 기포 CO₂의 상승에 동반하는 해수의 상승유동 및 중규모 영역으로부터의 해수유동에 영향을 받으며, DCO₂의 누출후 변화량인 Δ DCO₂의 분포는 기포 CO₂와 주변해수의 농도와 직접적으로 관계가 있음을 확인하였다.

- 4) 중규모 영역내 CO_2 는 근방역을 포함한 부근에서 상대적으로 높은 값을 보이는데, 이는 근방역의 수평방향 전체 해석영역이 중규모 영역의 한 개의 격자에 해당하고, 수직 방향으로는 동일하기 때문에 어느 정도 예측가능하고 결과 또한 정성적으로 타당하다고 판단된다. 또한, 해수유동에 의해 DCO_2 가 대류 및 확산하는 경향을 예측할 수 있었다. 단, 예측 정확도는 해수유동 재현성에 전적으로 의존하기 때문에, 앞서 설명한 조위비교 이외의 추가적인 검증이 필요하다고 생각된다.
- 5) CO_2 의 분압(pCO_2)은 DCO_2 에 비례하므로 계산 영역내의 pCO_2 의 변화량 (ΔpCO_2)은 ΔDCO_2 와 유사한 경향을 보이고 있으며, 영역 내 최대 ΔpCO_2 값은 모든 해석 수행 케이스에서 Kita(2006)가 제안한 환경영향평가의 기준치인 500ppm을 넘지 않았다.

제5장 결론

대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO_2)를 포집하여 저장(혹은 격리)하는 방법인 탄소 포집 및 저장 (CCS; Carbon Capture and Storage)법 중, 해양지중저장 (Geological sequestration under seafloor)법은 육상에 CO_2 저장공간이 부족한 나라에서 실행 가능한 저장법이다. 우리나라의 경우, 연간 100만톤 저장을 목표로 하여 2017년 초 포항 인근 해양지중에 약 100ton의 주입시험을 수행하였으나, 2017년 11월 인근에서 지진 발생 후 진행이 중지된 상태이다.

이에, 본 연구에서는 주입시험이 수행된 포항 인근 해양지중에 저장된 CO_2 가 지진 등으로 생성된 균열부를 통해 해저면에서 해수층으로 누출되는 경우를 상정하여, CO_2 기포의 상승 및 거동, CO_2 가 해수 중으로 용해되는 과정 및 해수에 용해된 CO_2 의 대류, 확산을 다중규모 해양수치모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 예측하고, 해양환경에 대한 영향을 평가하였다.

조위 비교 결과, 정성적인 경향이 일치했으며, 근방역에서는 수행한 해석케이스에서 CO_2 기포는 수면에 도달하기 전에 전부 용해되는 것으로 예측되었으며, 중규모 영역에서 $p\text{CO}_2$ 의 변화량이 Kita(2006)에서 제안한 기준치를 넘지 않았다.

본 연구에서 사용한 다중규모 해양수치모델은 해양지중에 저장된 CO_2 가 누출되는 다양한 상황 및 조건에 대한 환경영향 평가, 누출 모니터링 설비의 설치 위치 선정 등에 활용 가능할 것으로 기대된다.

이후, 기포 CO_2 의 직경, 누출위치, 누출면적, 누출량, 온도 및 염분 분포 변화 등의 영향 파악을 위한 파라미터 스터디가 필요하며, 환경영향 평가지표의 확립 및 적용에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

Choi, B. Y. Park, Y. C. Shinn Y. J., Kim K. Y., Chae G. T. & Kim J. C., (2015). Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO₂ injection pilot site: 1. Prediction of CO₂ plume migration. Journal of the Geological Society of Korea. 51(5), 487-496

Fujino, M., & Tabeta, S. (1991). Numerical Simulation of Tidal Currents by Means of Multi-level Model. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1991(170), 379-393.

Hino, M. (1987). A Very Simple Numerical Scheme of Non-Reflection and Complete Transmission Condition of Waves for Open Boundaries (in Japanese). Technical Report 38, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dec.

Hong G. H., Park C. H., Kim H. J. (2005). CO₂ Sequestration in Geological Structures in the Maritime Area: A Preliminary Review. Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, 8(4), 203-212.

Japan Oceanographic Data Center,
http://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/depth500_file_j.html

Jeong, S. M., Sato, T., Chen, B., & Tabeta, S. (2010). Numerical Simulation on Multi-scale Diffusion of CO₂ Injected in the Deep Ocean in a Practical Scenario. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4(1), 64-72.

Kang K. G., Huh C., Kang S. G. (2015). A Numerical Study on the CO₂ Leakage Through the Fault During Offshore Carbon Sequestration. Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, 18(2), 94-101.

Kang S. G., Huh C. (2008). The Latest Progress on the Development of Technologies for CO₂ Storage in Marine Geological Structure and its Application in Republic of Korea. Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, 11(1) 24-34.

Kano, Y., Sato, T., Kita, J., Hirabayashi, S., & Tabeta, S. (2009). Model Prediction on the Rise of pCO₂ in Uniform Flows by Leakage of CO₂ purposefully Stored under the Seabed. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(5), 617-625.

Kano, Y., Sato, T., Kita, J., Hirabayashi, S., & Tabeta, S. (2010). Multi-scale Modeling of CO₂ Dispersion Leaked from Seafloor off the Japanese Coast. Marine Pollution Bulletin, 60(2), 215-224.

Kita, J. (2006). Impact Assessment of High-CO₂ Environment on Marine Organisms. In Proceedings of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Elsevier.

Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, <http://www.khoa.go.kr/>

Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Crim, R., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., ... & Gattuso, J. P. (2013). Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. Global change biology, 19(6), 1884-1896.

Kwon Y. K. (2018), Demonstration-scale Offshore CO₂ Storage Project in the Pohang Basin, Korea. The Journal of Engineering Geology, 28(2), 133-160
Kyoto Protocol - Targets for the First Commitment Period,
<https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>

Lee H. S., Choi D. H., Park J. C., Jeong S. M., Kim Y. H. (2010). Study on Tidal Current Simulation and its Application to Speed Trial around Straits of Korea. Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(6), 23-29.

Lesser, M. P. (1997). Oxidative stress causes coral bleaching during exposure to elevated temperatures. Coral reefs, 16(3), 187-192.

Matsumoto, K., Takanezawa, T., & Ooe, M. (2000). Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan. Journal of Oceanography, 56(5), 567-581.

MEC Ocean Model, <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/>

Mizumukai, K., Satot, T., & Tabeta, S. (2007). Numerical Evaluation on the Effect of Density Current Generator to Oxygen-Deficient Water in Ariake Sea. In OCEANS 2006-Asia Pacific (pp. 1-5). IEEE.

Mori, C., Sato, T., Kano, Y., Oyama, H., Aleynik, D., Tsumune, D., & Maeda, Y. (2015). Numerical Study of the Fate of CO₂ purposefully Injected into the Sediment and Seeping from Seafloor in Ardmucknish Bay. International Journal of Greenhouse Gas Control, 38, 153-161.

Munk, W. H. and Arderson, E. R. (1948). Note on the Theory of the Thermocline. J. Mar. Res., 7, 276-295.

Pörtner, H. O., Langenbuch, M., & Reipschläger, A. (2004). Biological impact of elevated ocean CO₂ concentrations: lessons from animal physiology and earth history. Journal of Oceanography, 60(4), 705-718.

Quantifying and Monitoring Environmental Impacts of Geological Carbon Storage(QICS) Project, <https://www.globalccsinstitute.com/projects/qics-project>

Sato, T., & Sato, K. (2002). Numerical prediction of the dilution process and its biological impacts in CO₂ ocean sequestration. Journal of Marine Science and Technology, 6(4), 169-180.

Sato, T. (2004). Numerical simulation of biological impact caused by direct injection of carbon dioxide in the ocean. Journal of Oceanography, 60(4), 807-816.

The Research Institute for Innovative Technology for the Earth (RITE). 2004. Annual Report of CO₂ Geological Sequestration Project, 2, 158-213(in Japanese).

Tomakomai CCS Demonstration Project,
<http://www.japanccs.com/en/business/demonstration/>

United States Geological Survey(USGS), <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>

Webb, E. K. (1970). Profile Relationships: The Log-linear Range, and Extension to Strong Stability. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 96(407), 67-90.

Zhang, J., & Kitazawa, D. (2015). Numerical Analysis of Particulate Organic Waste Diffusion in an Aquaculture Area of Gokasho Bay, Japan. Marine Pollution Bulletin, 93(1-2), 130-143.

석문식. (1991). 지구온난화에 따른 해양 환경변화와 연구방향. Ocean Policy Research, 6(2), 433-442.

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2014). 이산화탄소 지중저장실증을 위한 저장지층 특성화 및 기본설계 기술개발 보고서

부록

A.1 격자 수렴도 테스트

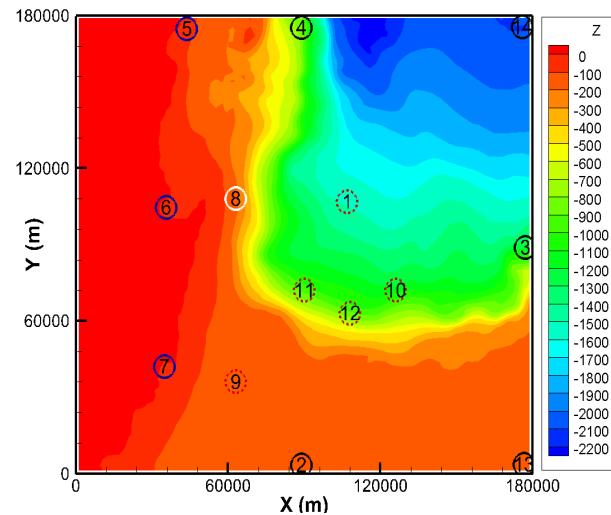


Fig. A.1-1 Location of comparison point

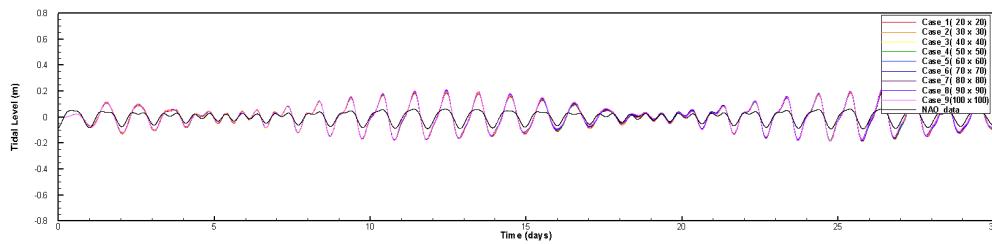


Fig. A.1-2 Comparison of tidal level at No.1

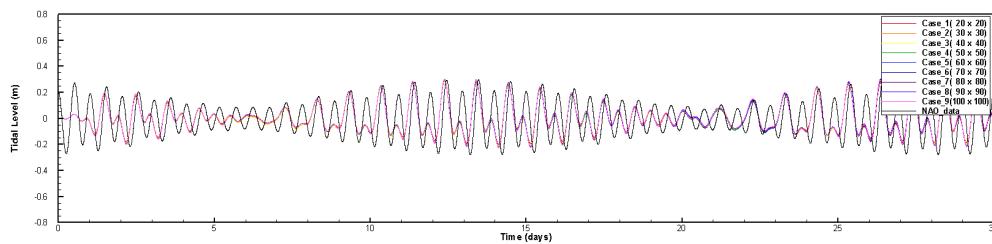


Fig. A.1-3 Comparison of tidal level at No.2

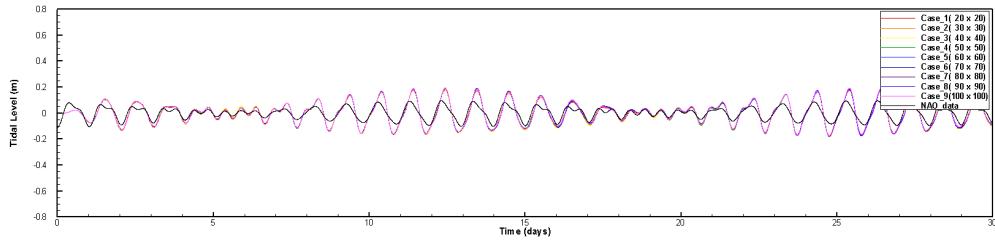


Fig. A.1-4 Comparison of tidal level at No.3

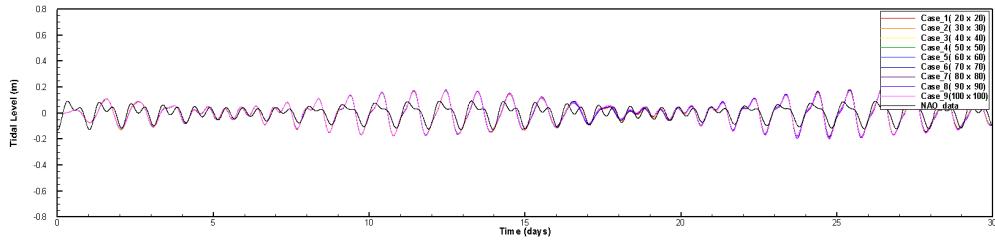


Fig. A.1-5 Comparison of tidal level at No.4

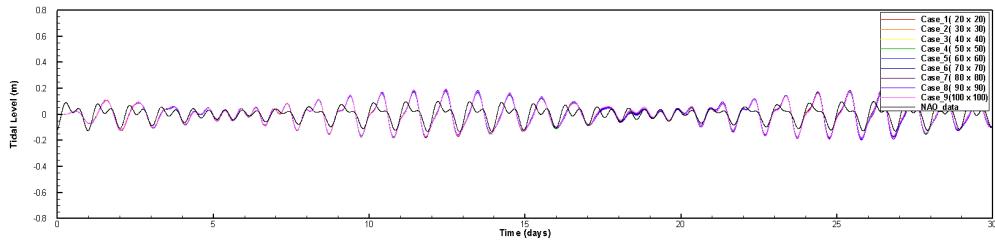


Fig. A.1-6 Comparison of tidal level at No.5

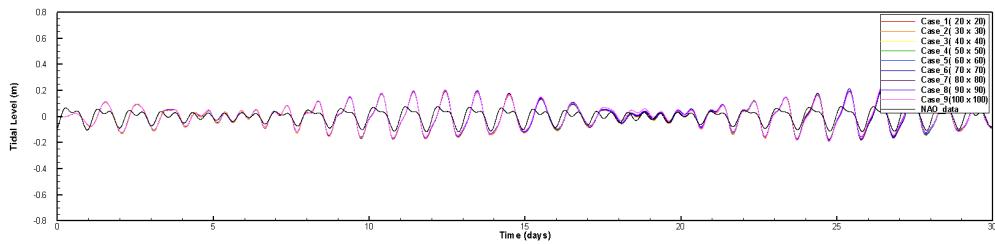


Fig. A.1-7 Comparison of tidal level at No.6

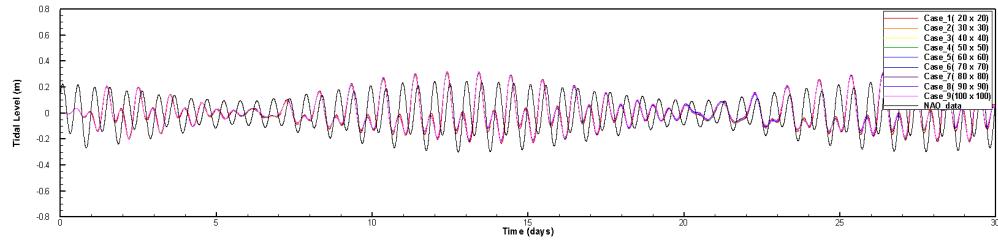


Fig. A.1-8 Comparison of tidal level at No.7

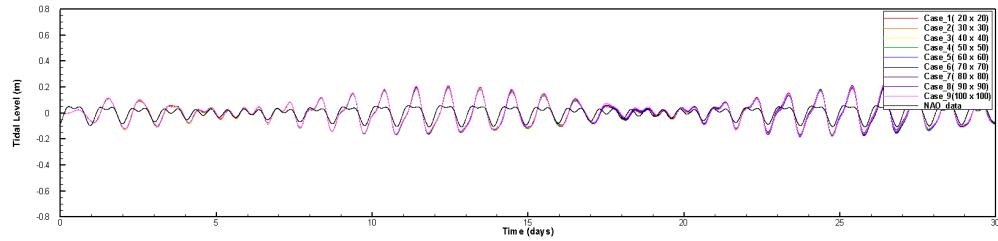


Fig. A.1-9 Comparison of tidal level at No.8

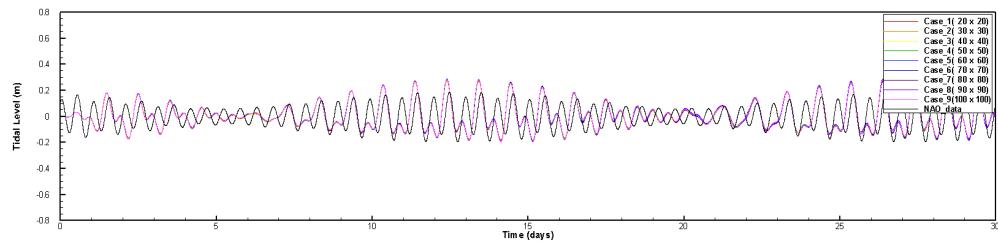


Fig. A.1-10 Comparison of tidal level at No.9

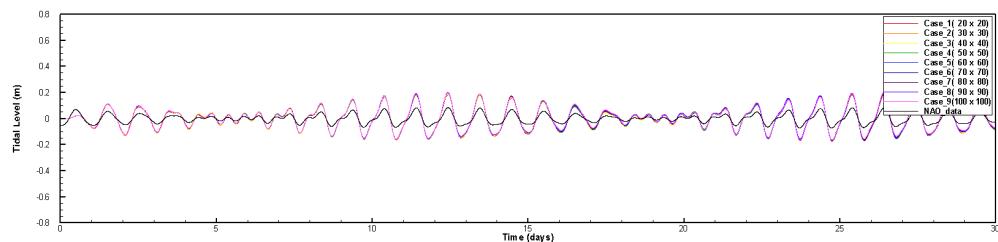


Fig. A.1-11 Comparison of tidal level at No.10

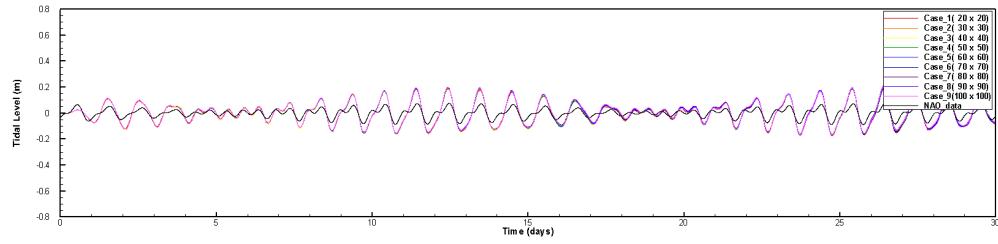


Fig. A.1-12 Comparison of tidal level at No.11

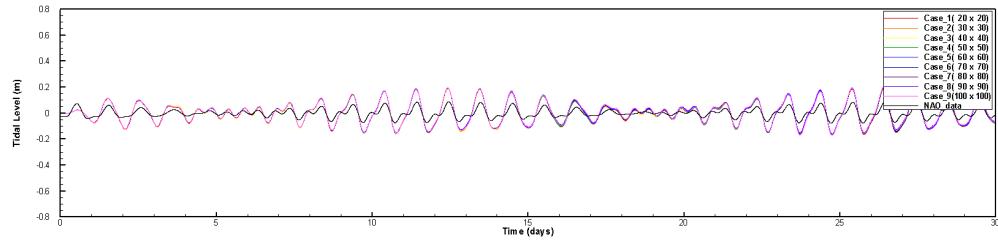


Fig. A.1-13 Comparison of tidal level at No.12

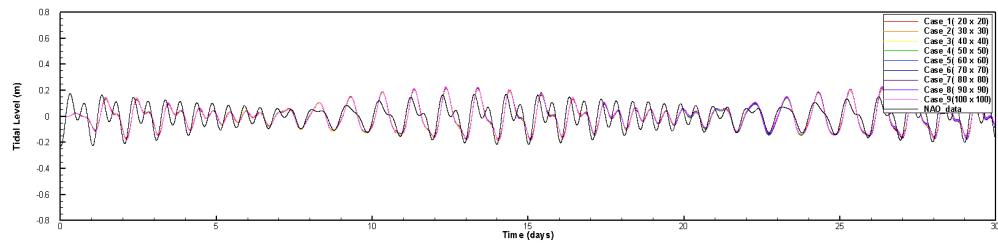


Fig. A.1-14 Comparison of tidal level at No.13

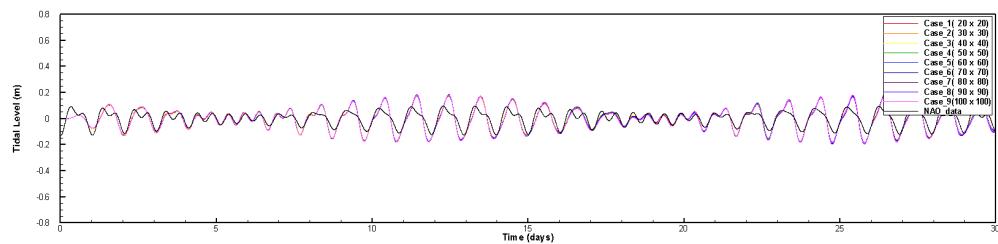


Fig. A.1-15 Comparison of tidal level at No.14

A.2 근방역에서의 해수중 용해된 CO_2 (DCO_2) 변화량(ΔC)

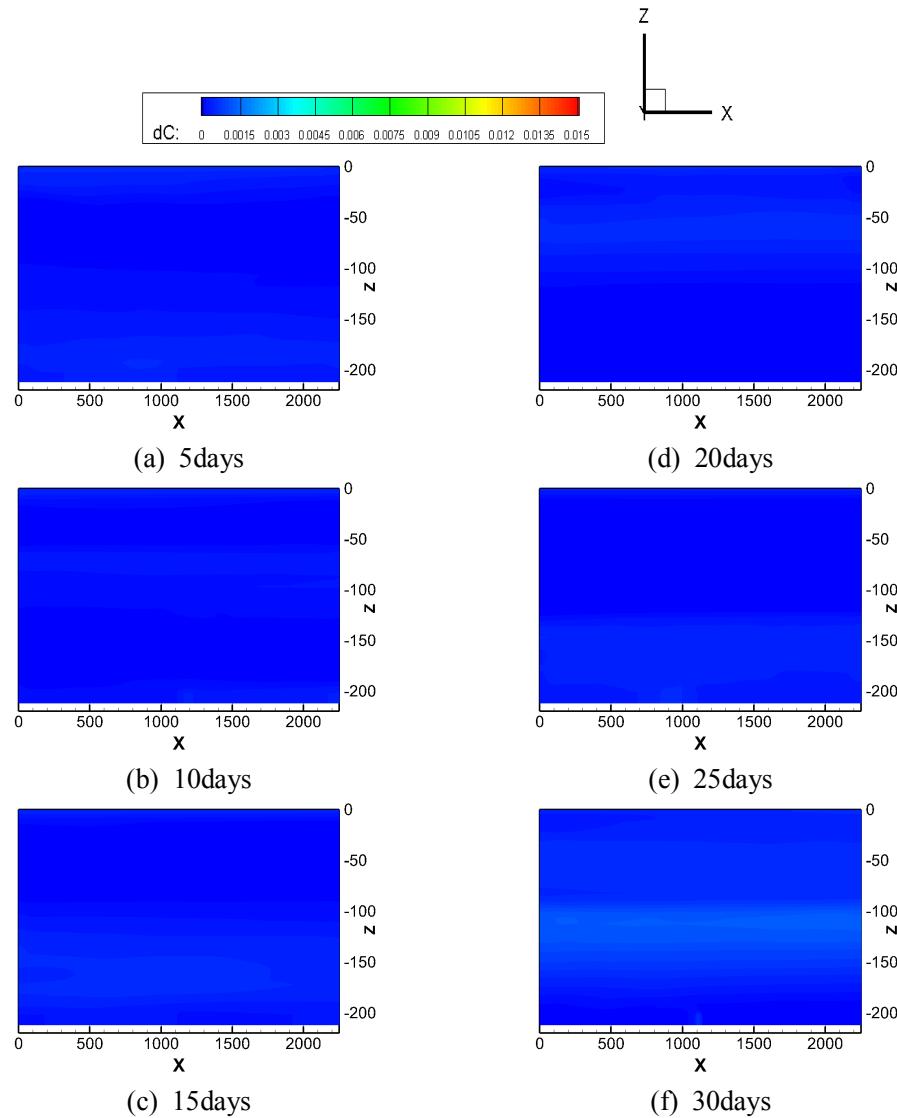


Fig. A.2-1 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
 in xz plane($y = 1,125\text{m}$) in small-scale region
 after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
 (case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

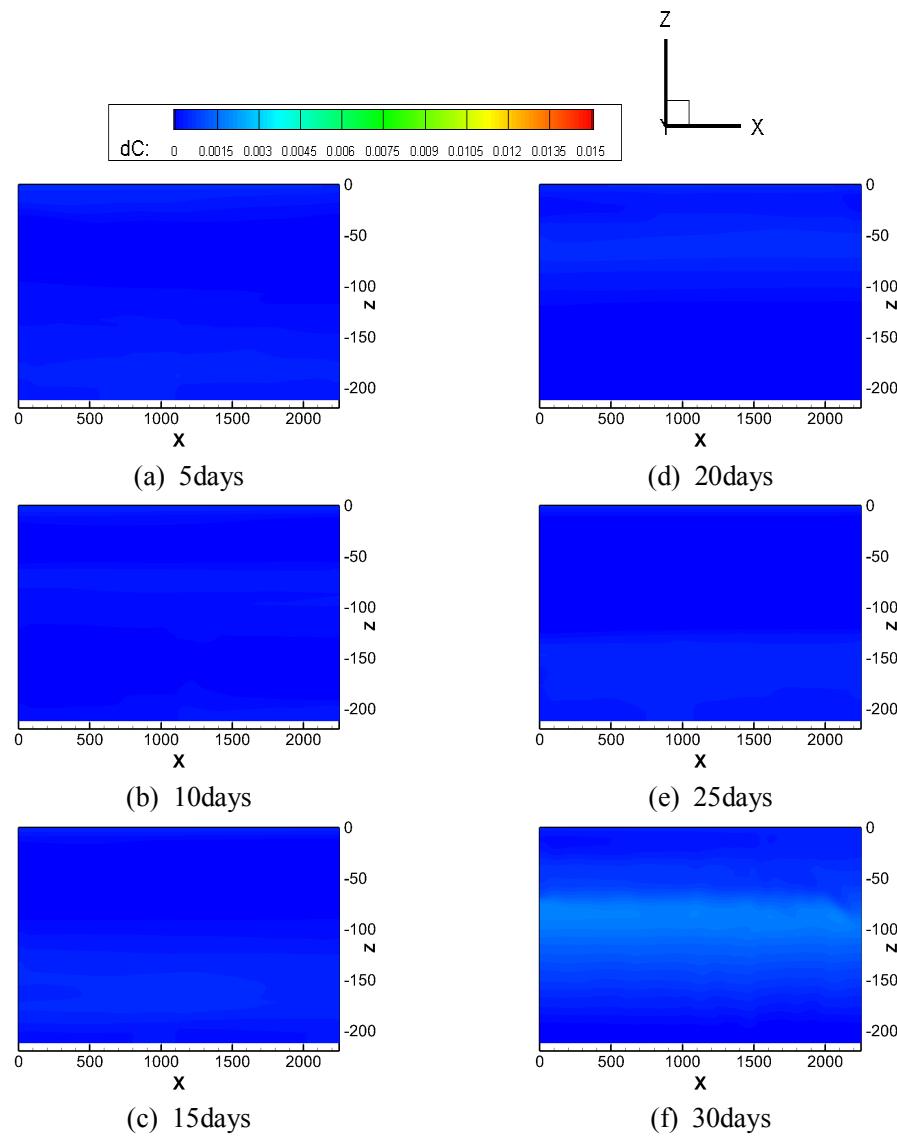


Fig. A.2-2 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

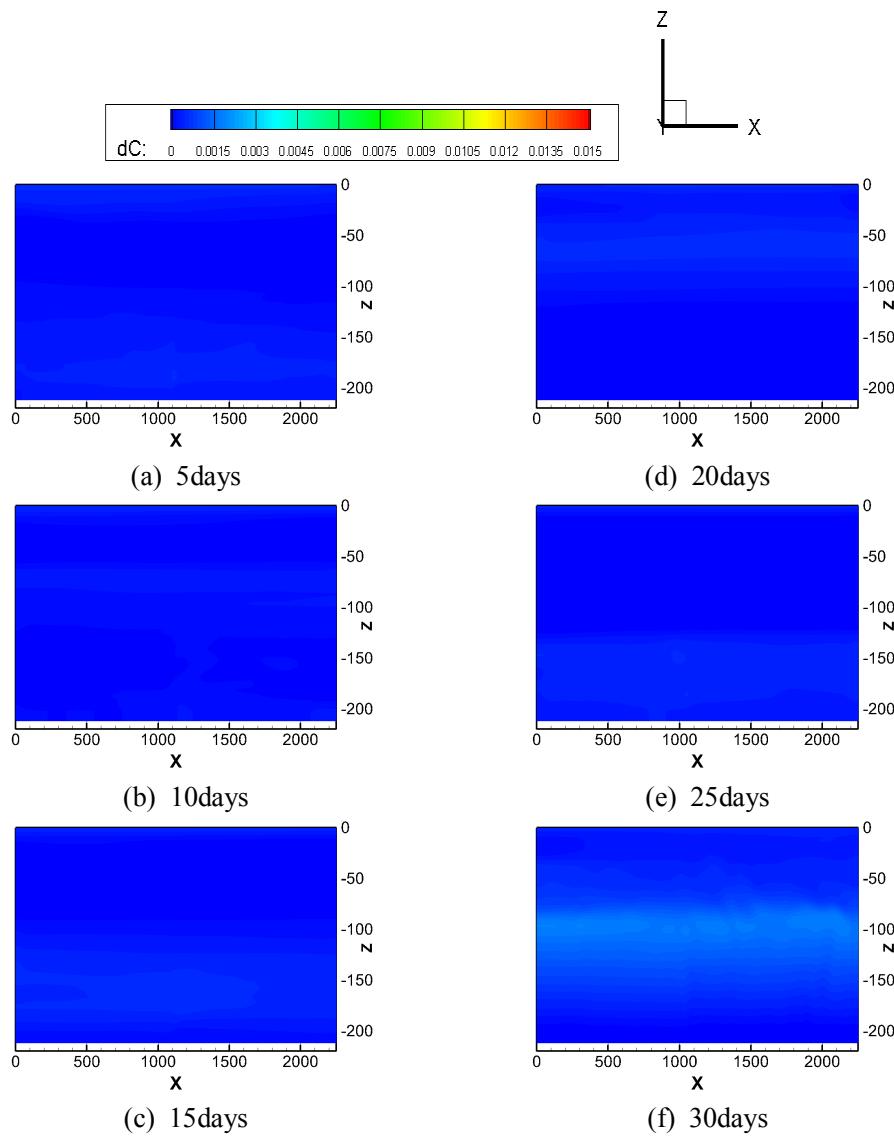


Fig. A.2-3 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 90%)

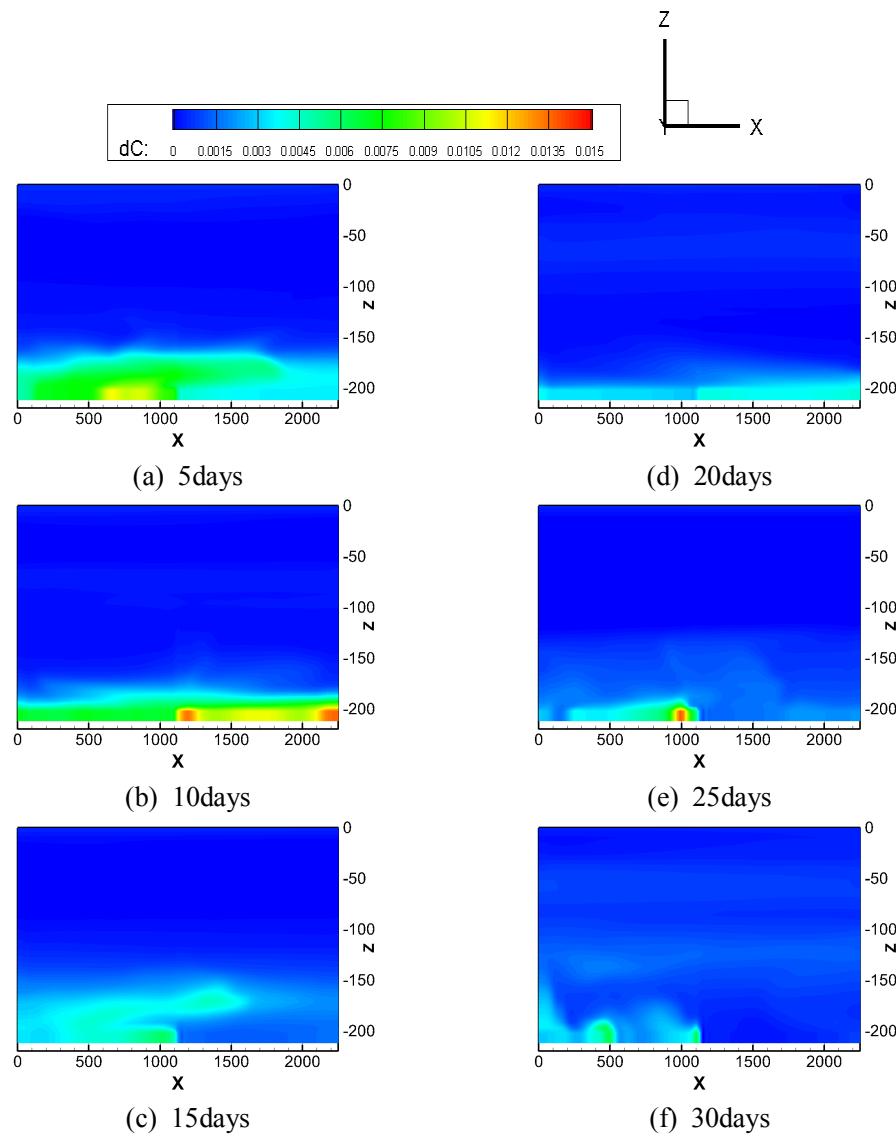


Fig. A.2-4 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

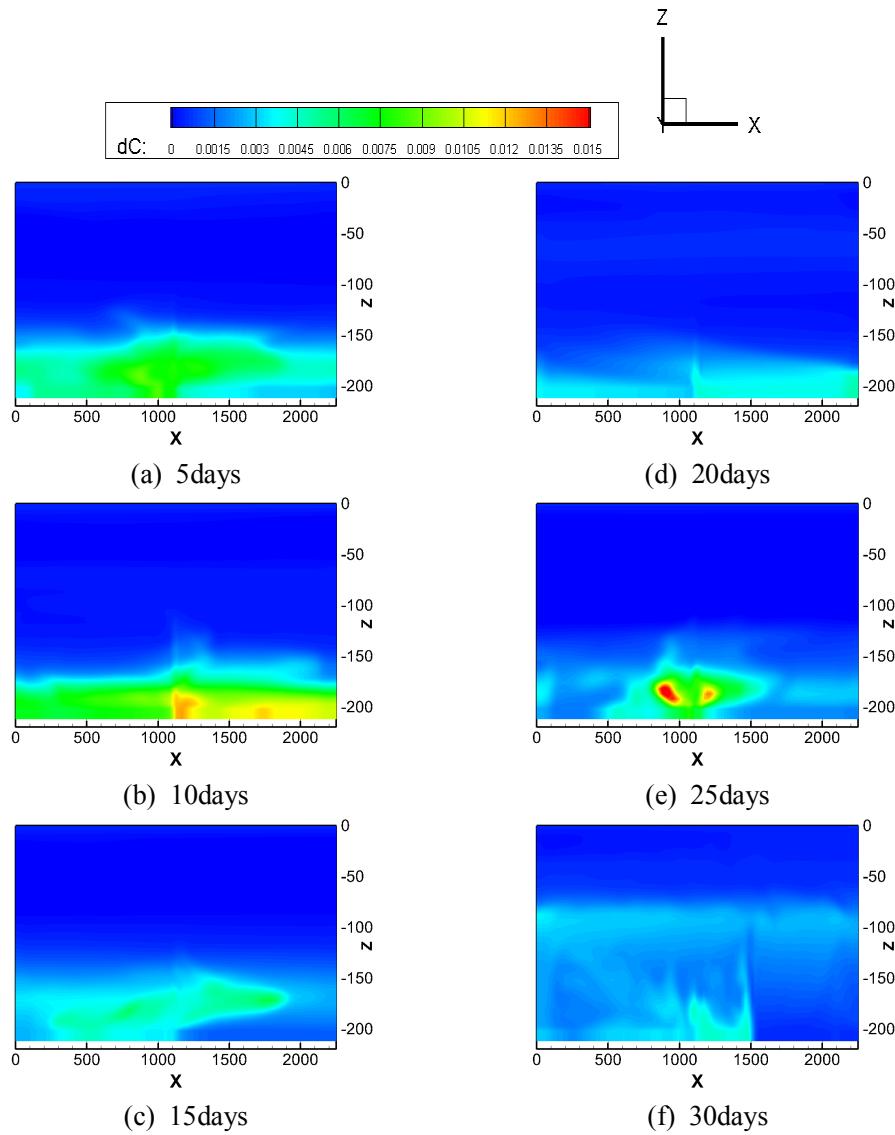


Fig. A.2-5 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

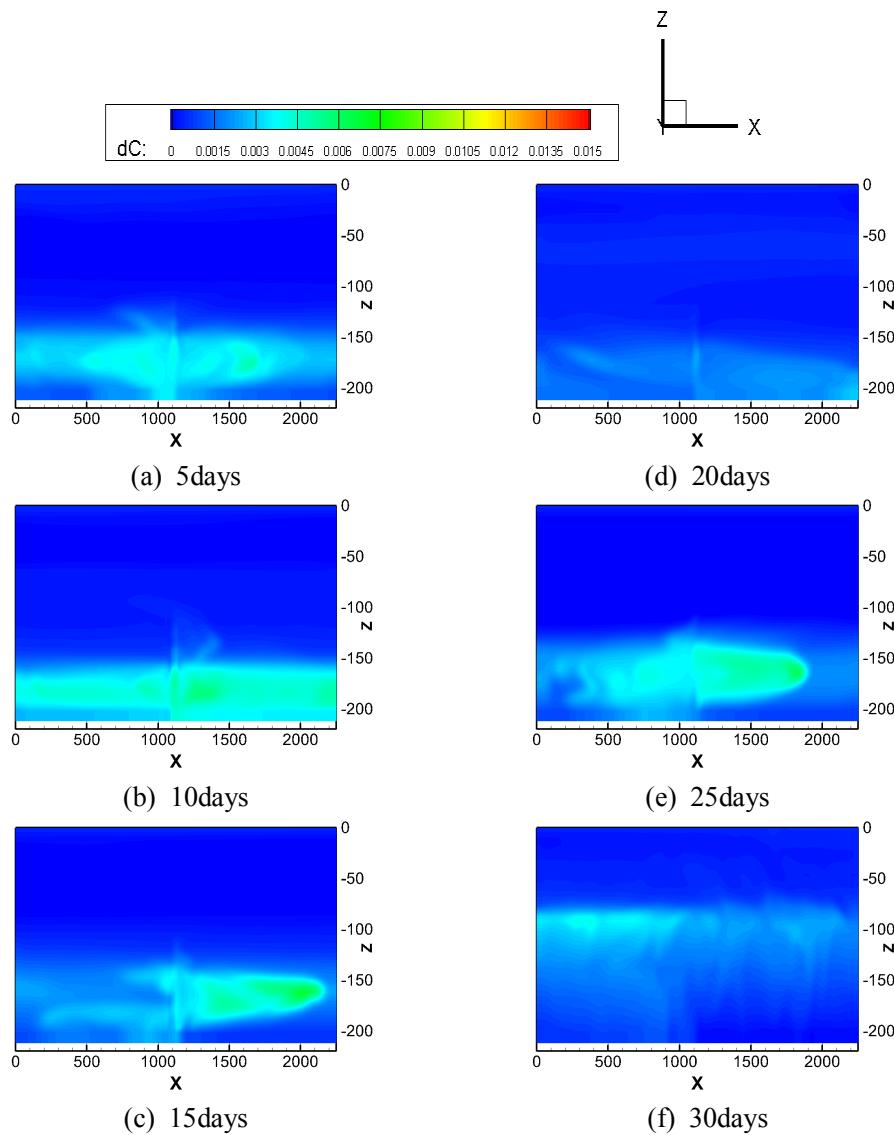


Fig. A.2-6 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

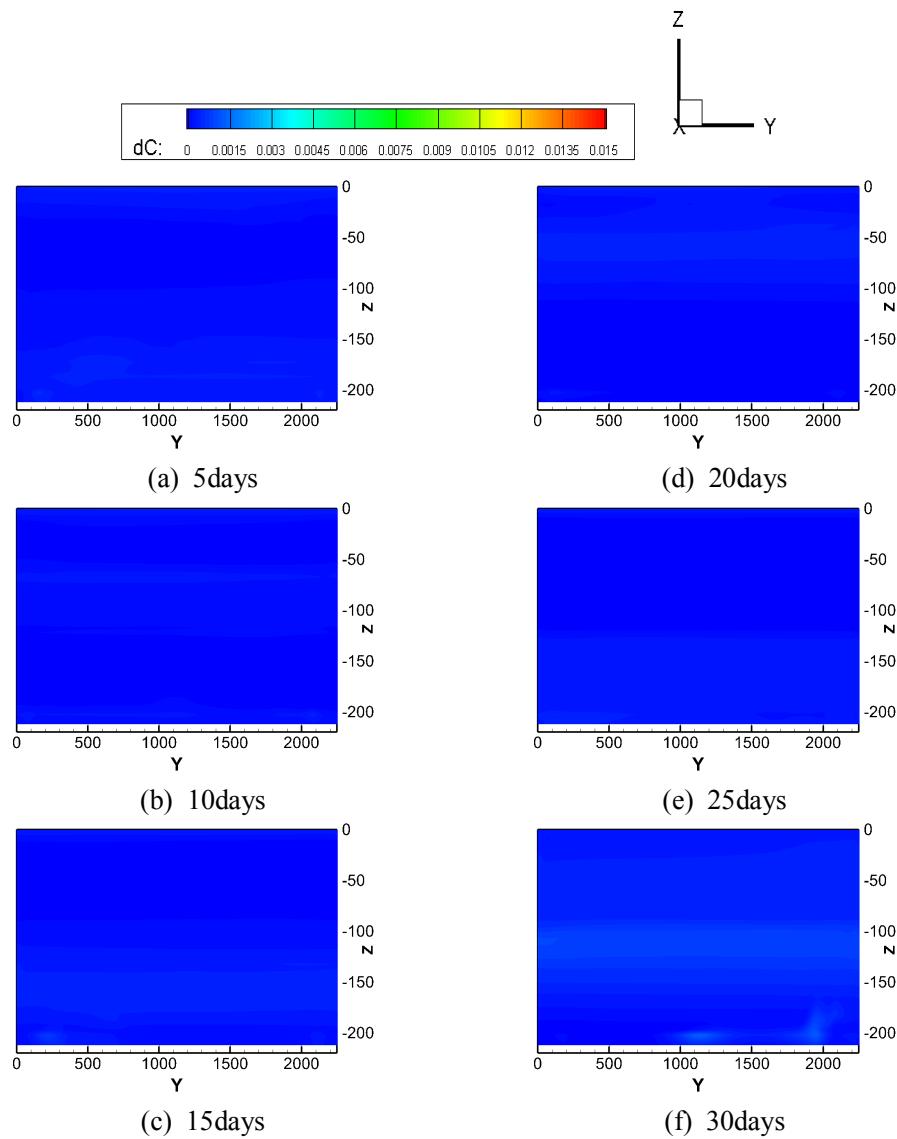


Fig. A.2-7 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 1, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

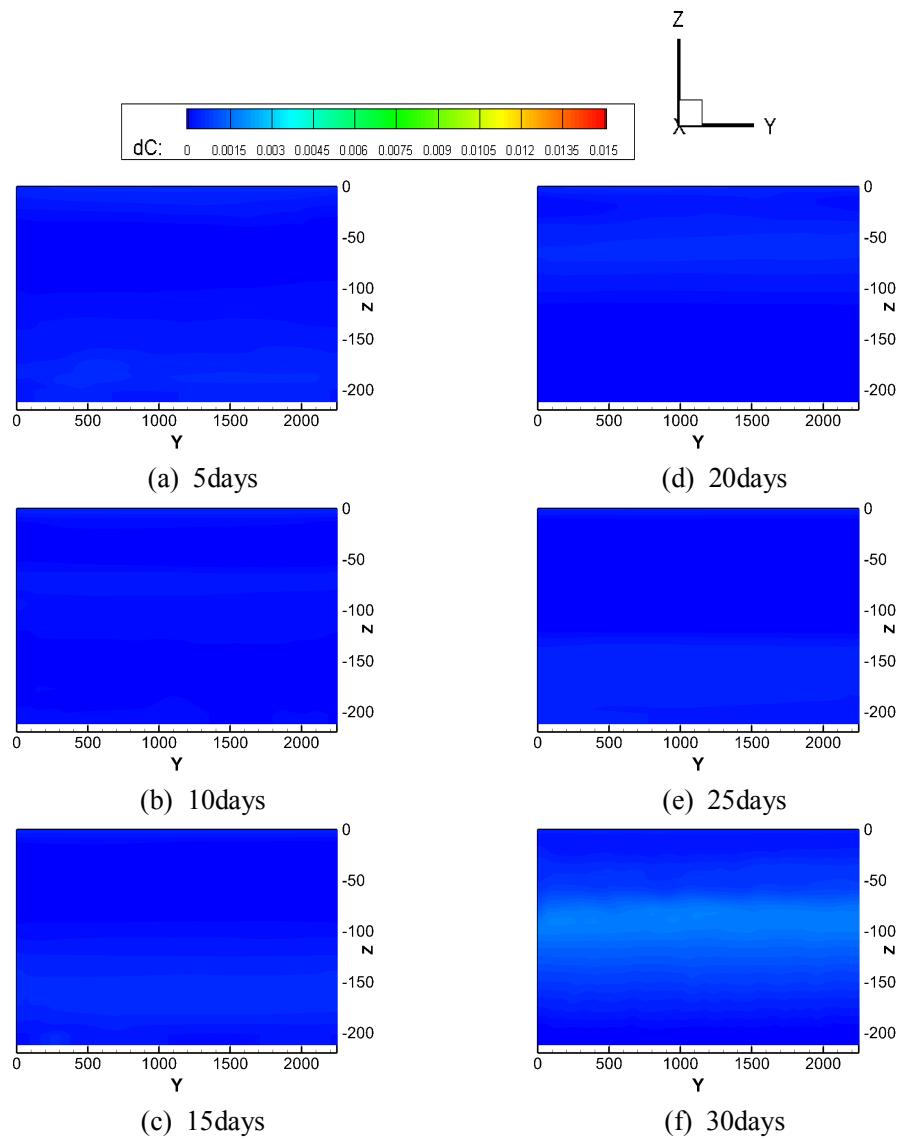


Fig. A.2-8 Contour maps of ΔDC including leakage point
in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 50%)

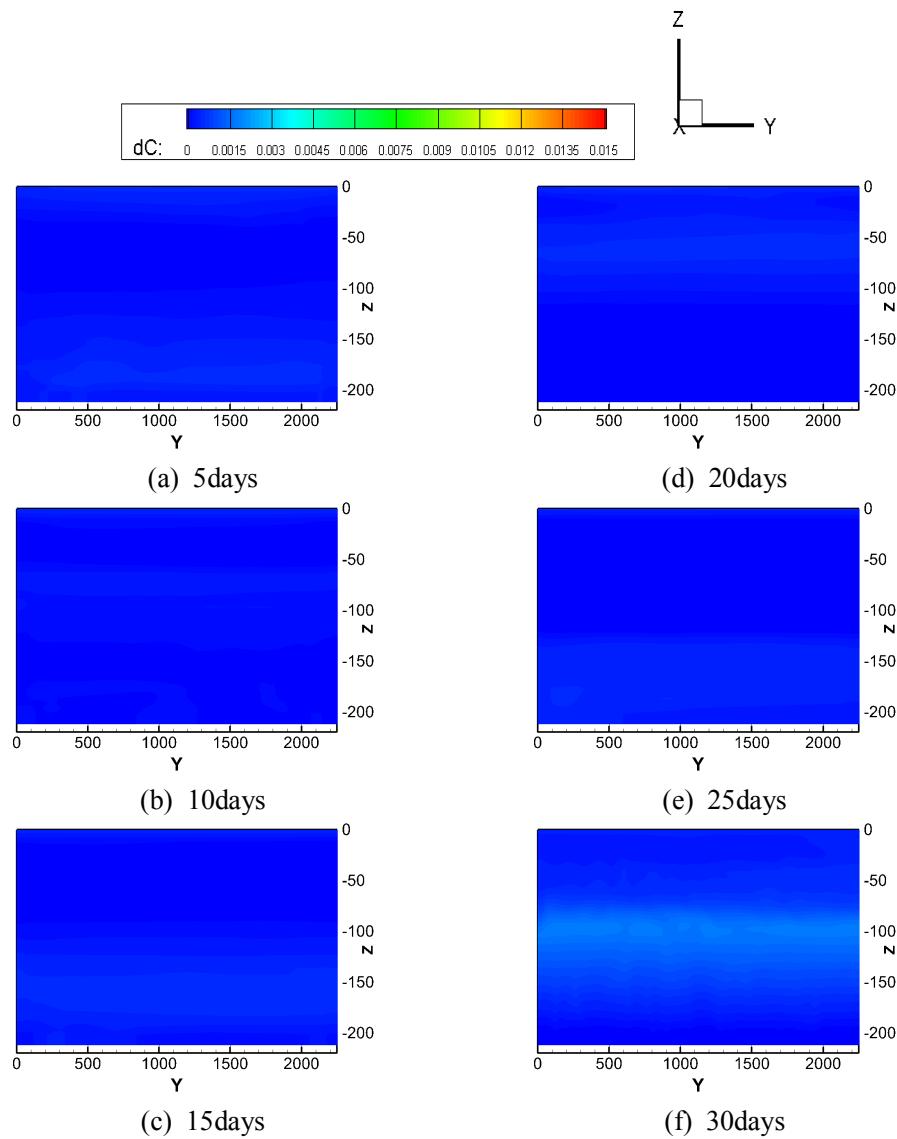


Fig. A.2-9 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in yz-plane($x = 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

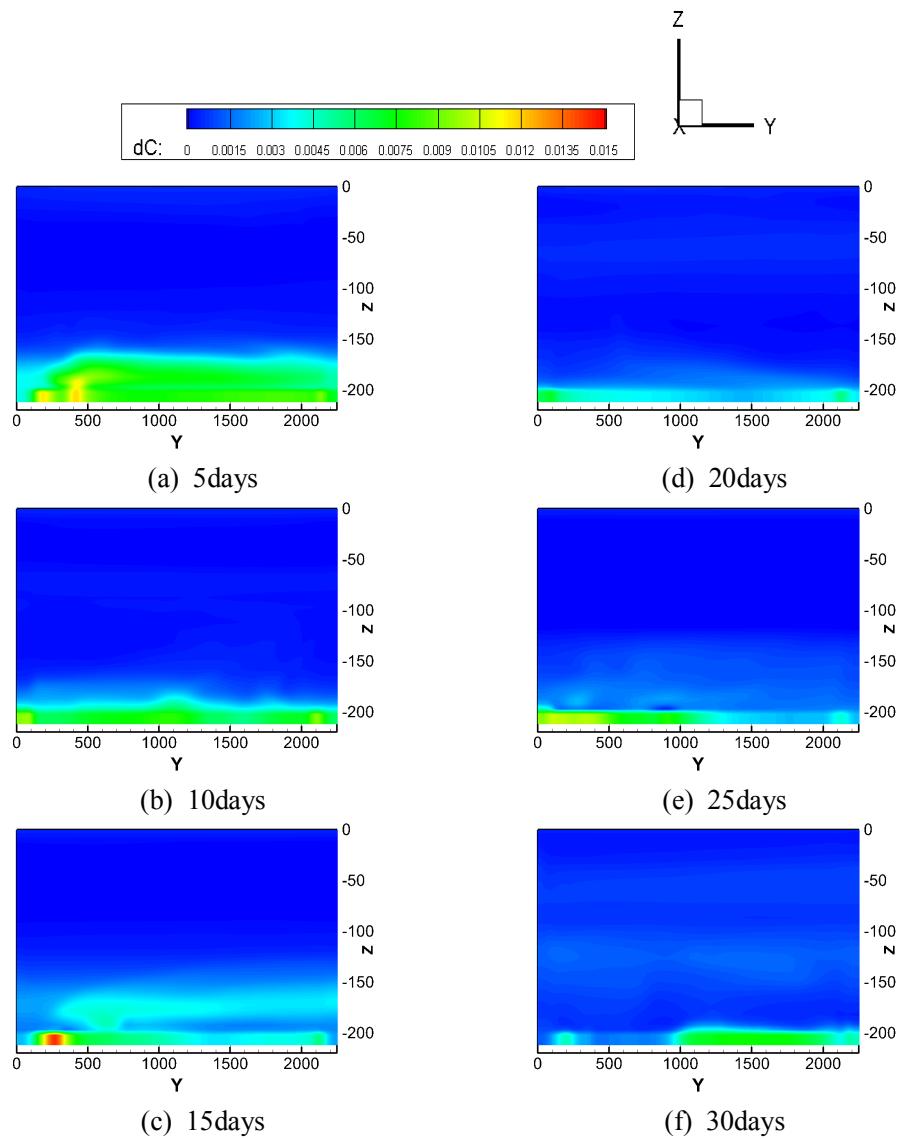


Fig. A.2-10 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in yz-plane($x= 1,125m$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 4, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

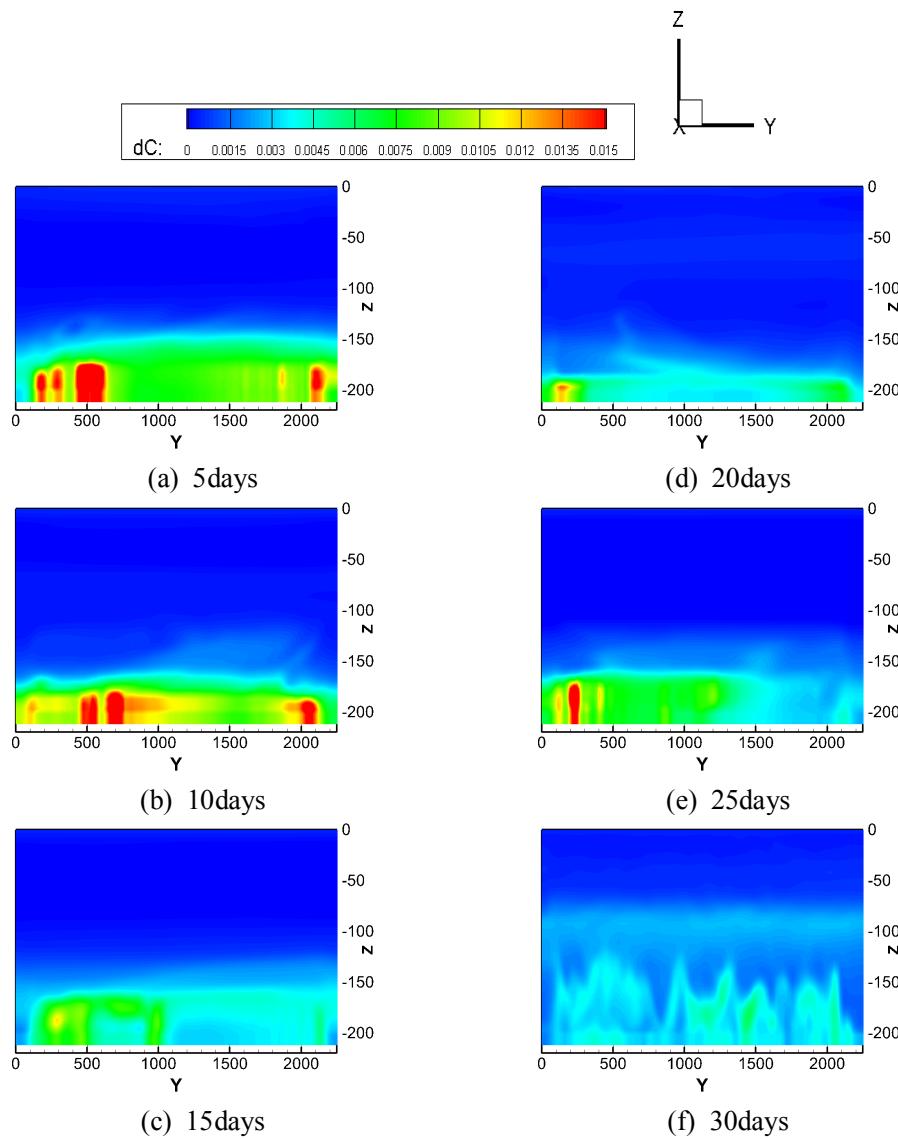


Fig. A.2-11 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point in yz-plane($x= 1,125\text{m}$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage (case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

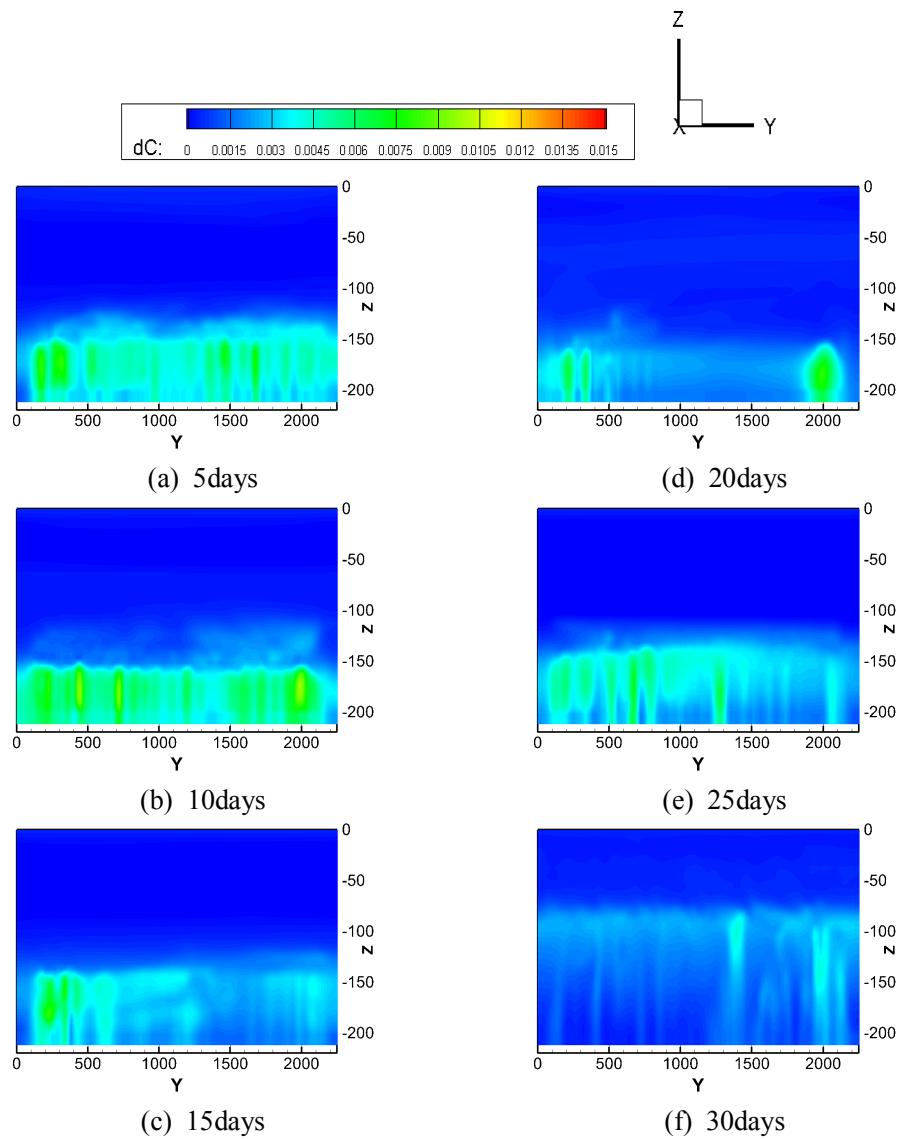


Fig. A.2-12 Contour maps of ΔDC_{CO_2} including leakage point
in yz-plane($x= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 6, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 90%)

A.3 근방역에서의 CO₂ 분압(pCO₂) 변화량($\Delta p\text{CO}_2$)

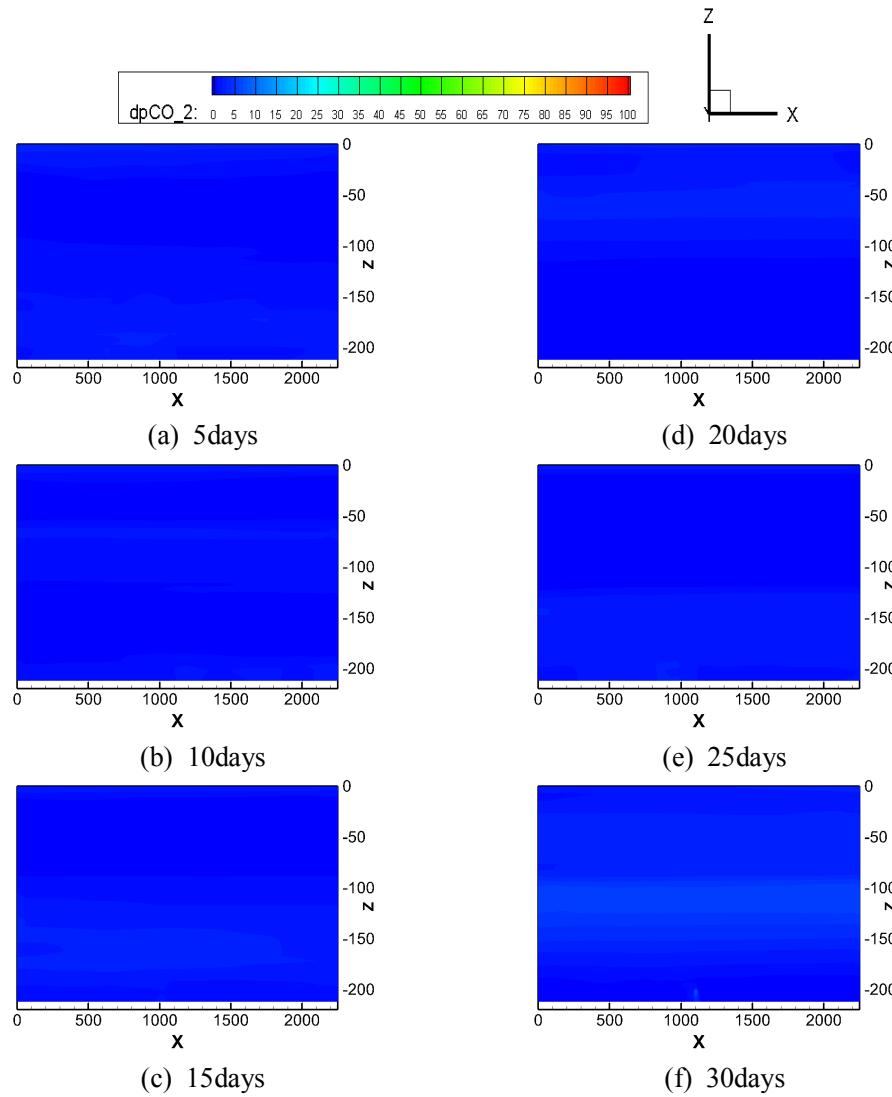


Fig. A.3-1 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point
in xz-plane($y= 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 1, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

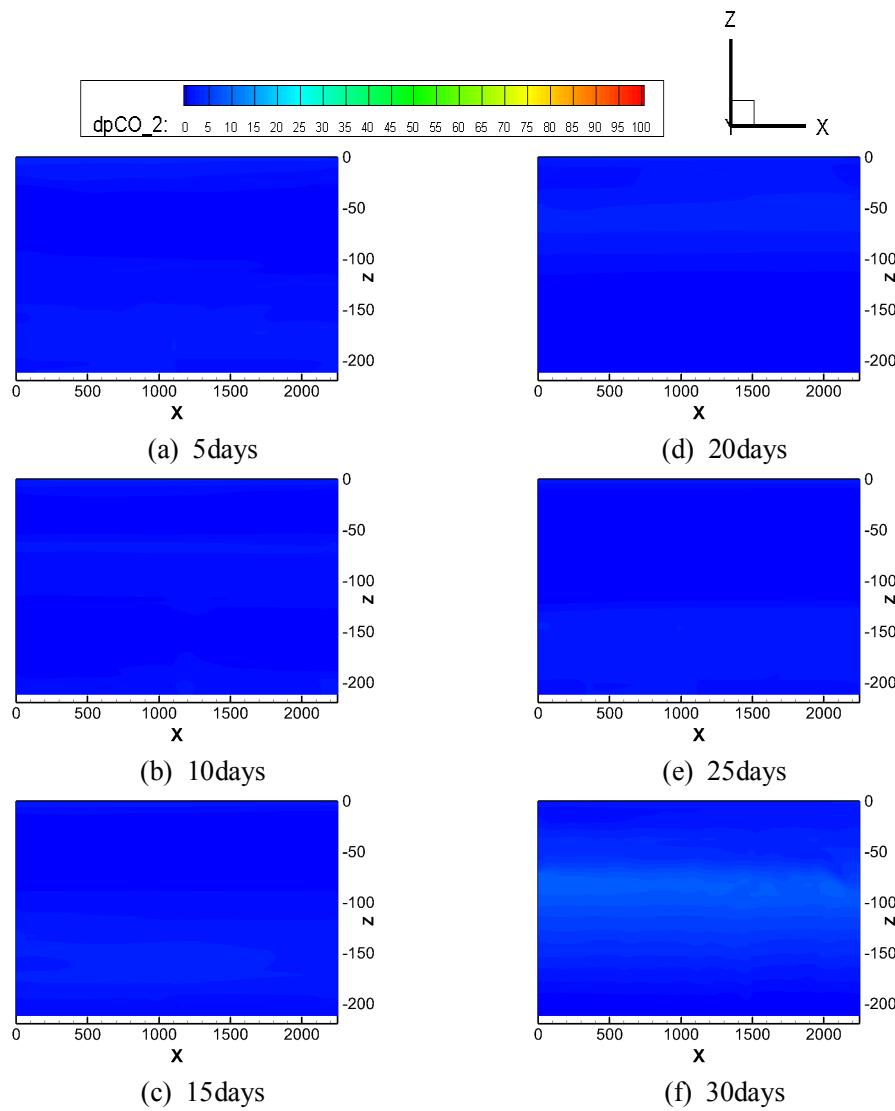


Fig. A.3-2 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in xz-plane($y = 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

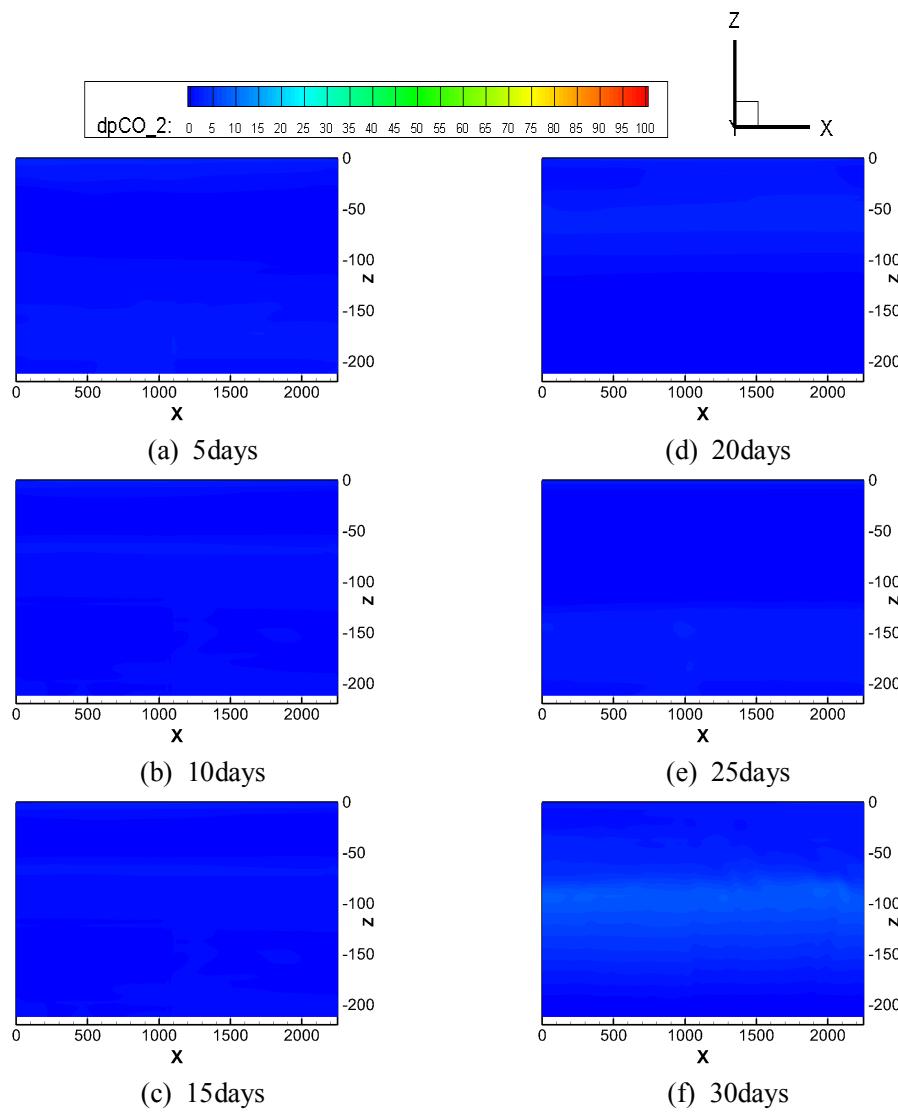


Fig. A.3-3 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in xz-plane($y= 1,125m$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

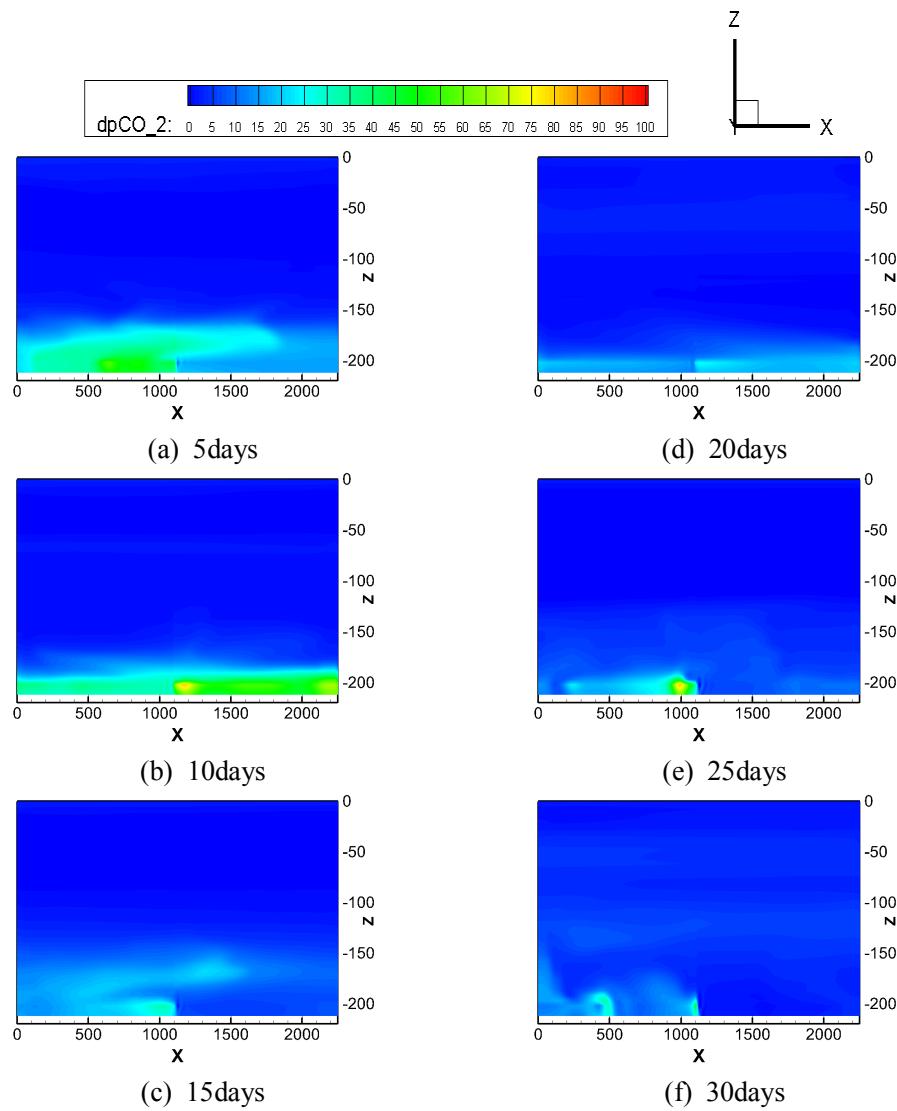


Fig. A.3-4 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point in xz-plane($y = 1,125\text{m}$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage (case 4, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

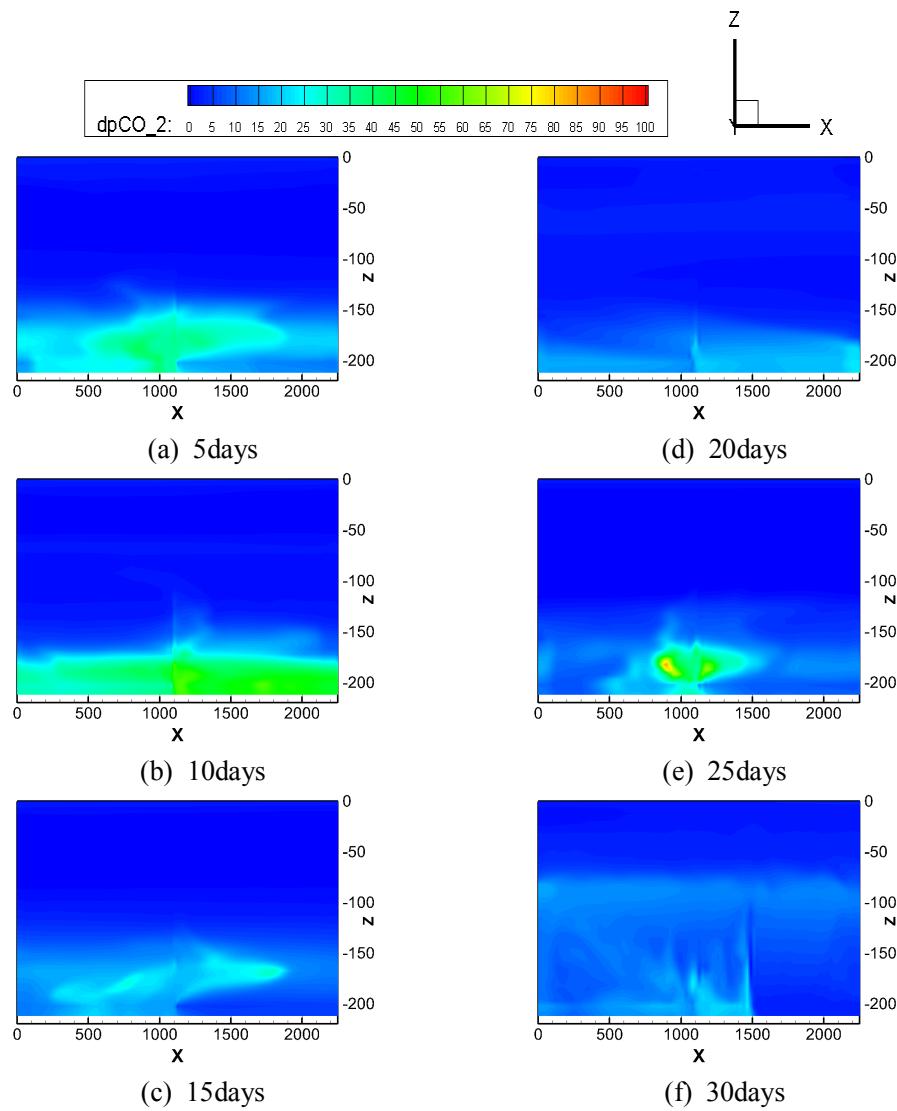


Fig. A.3-5 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point in xz-plane($y=1,125\text{m}$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage (case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

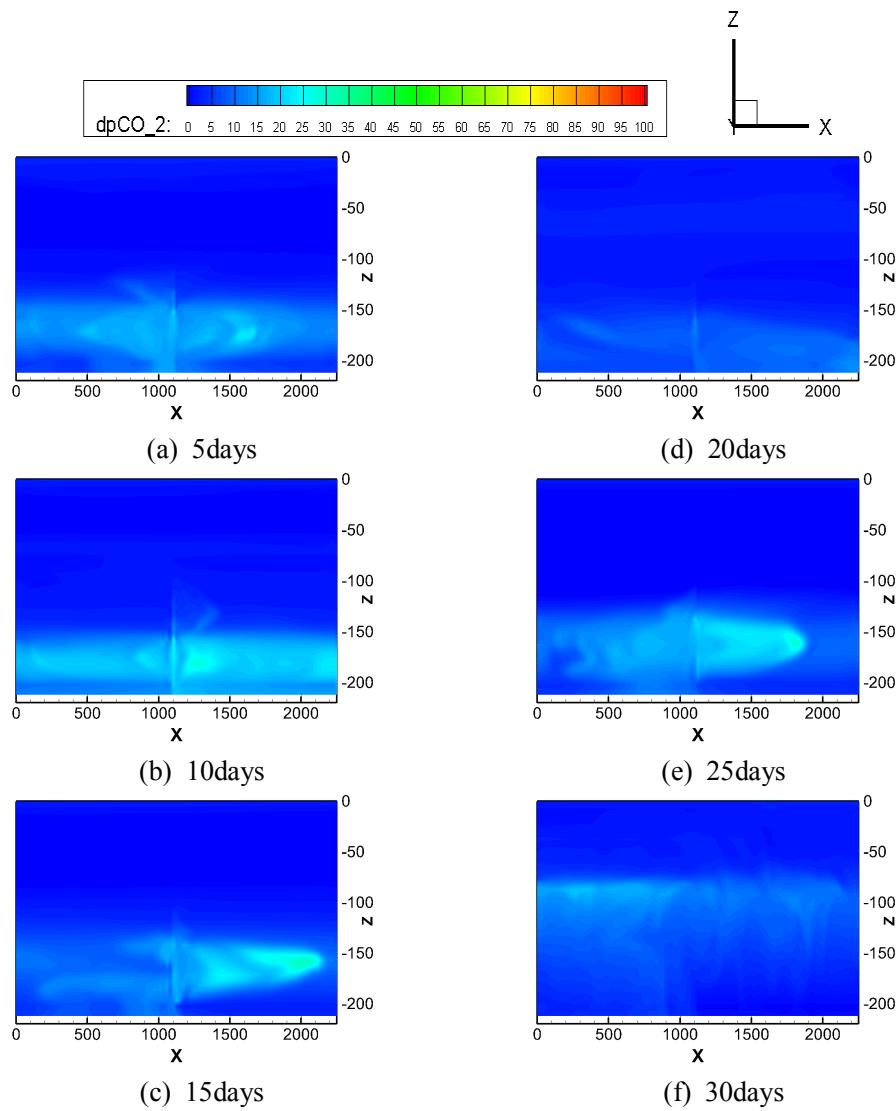


Fig. A.3-6 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point
in xz-plane($y = 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 6, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 90%)

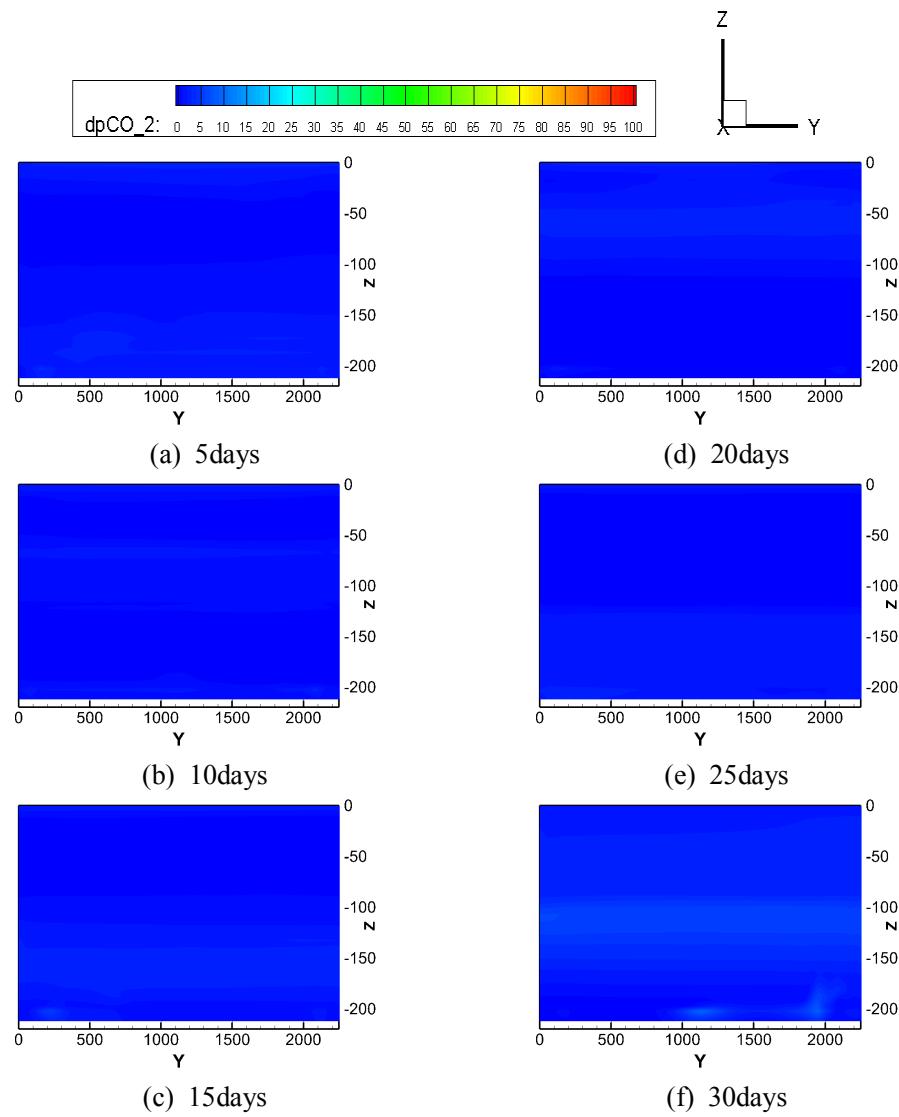


Fig. A.3-7 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point
in yz-plane($x = 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

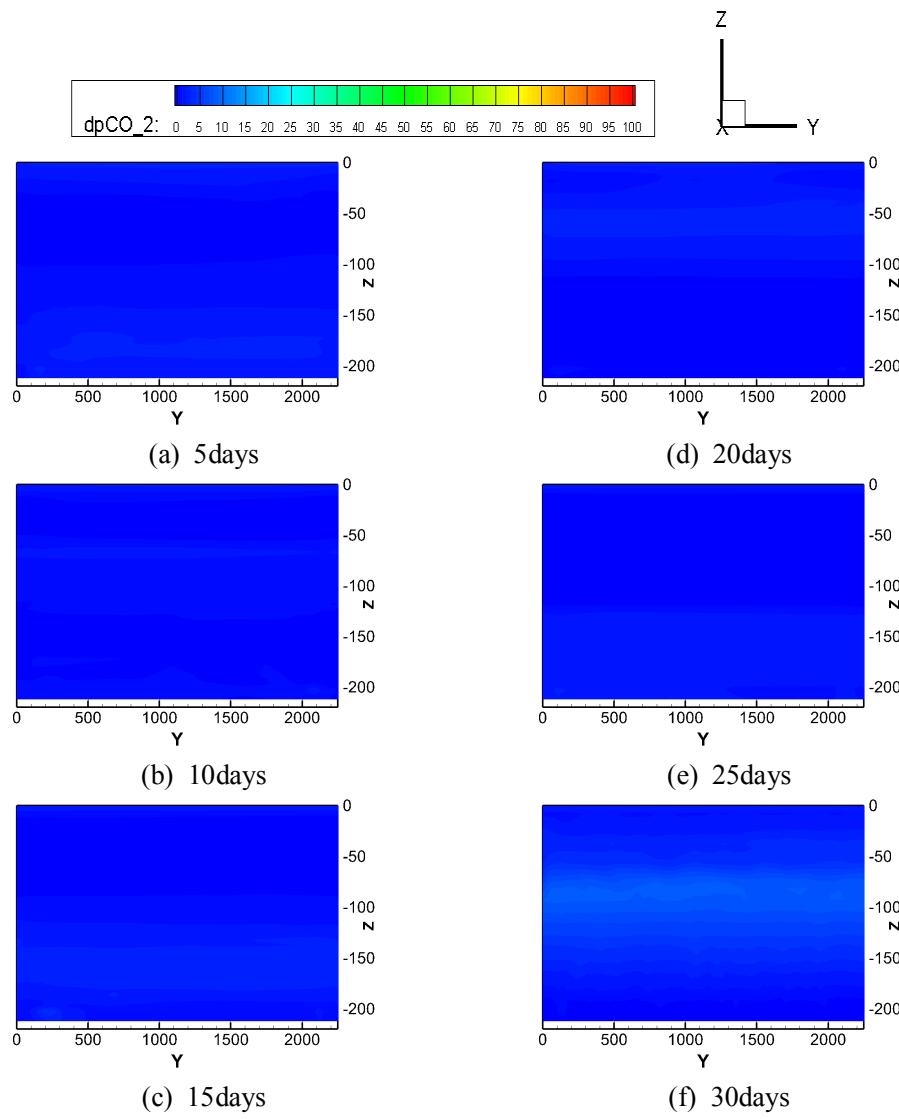


Fig. A.3-8 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point
in yz-plane($x = 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 50%)

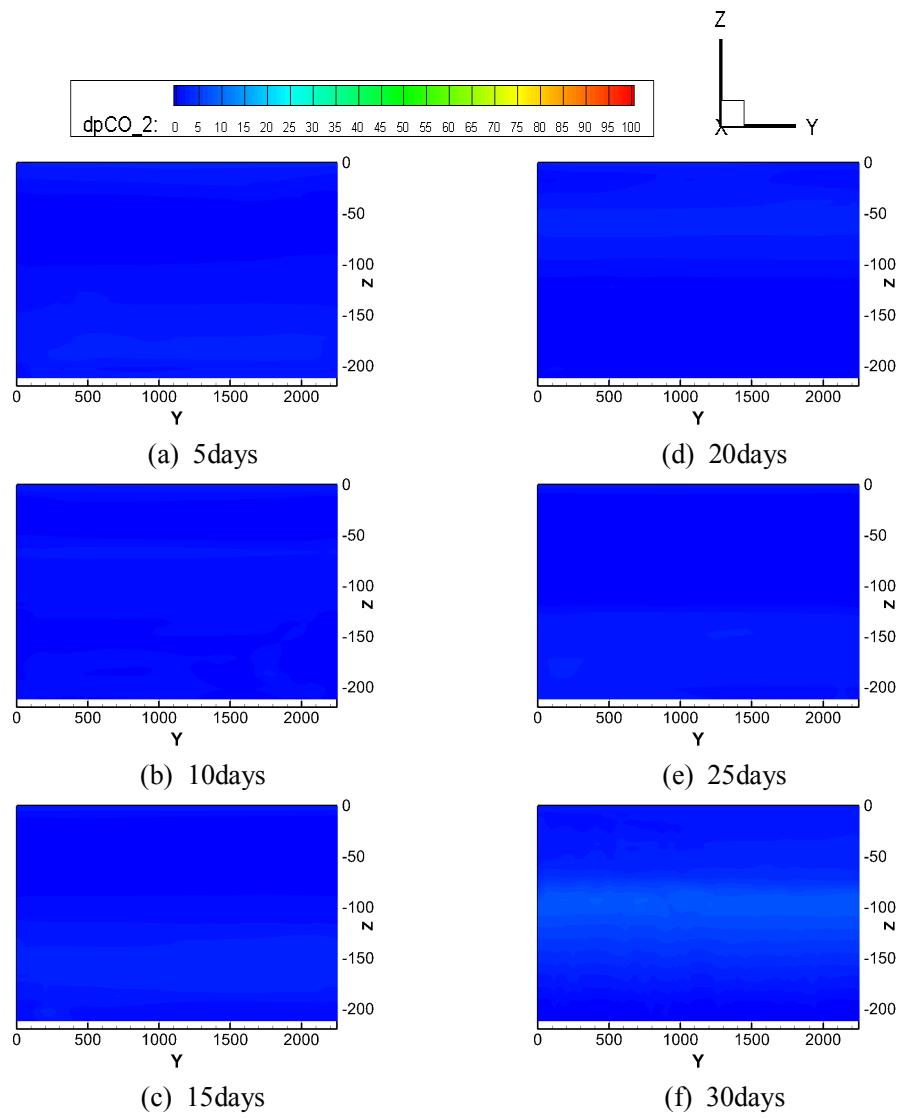


Fig. A.3-9 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in yz-plane($x = 1,125m$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

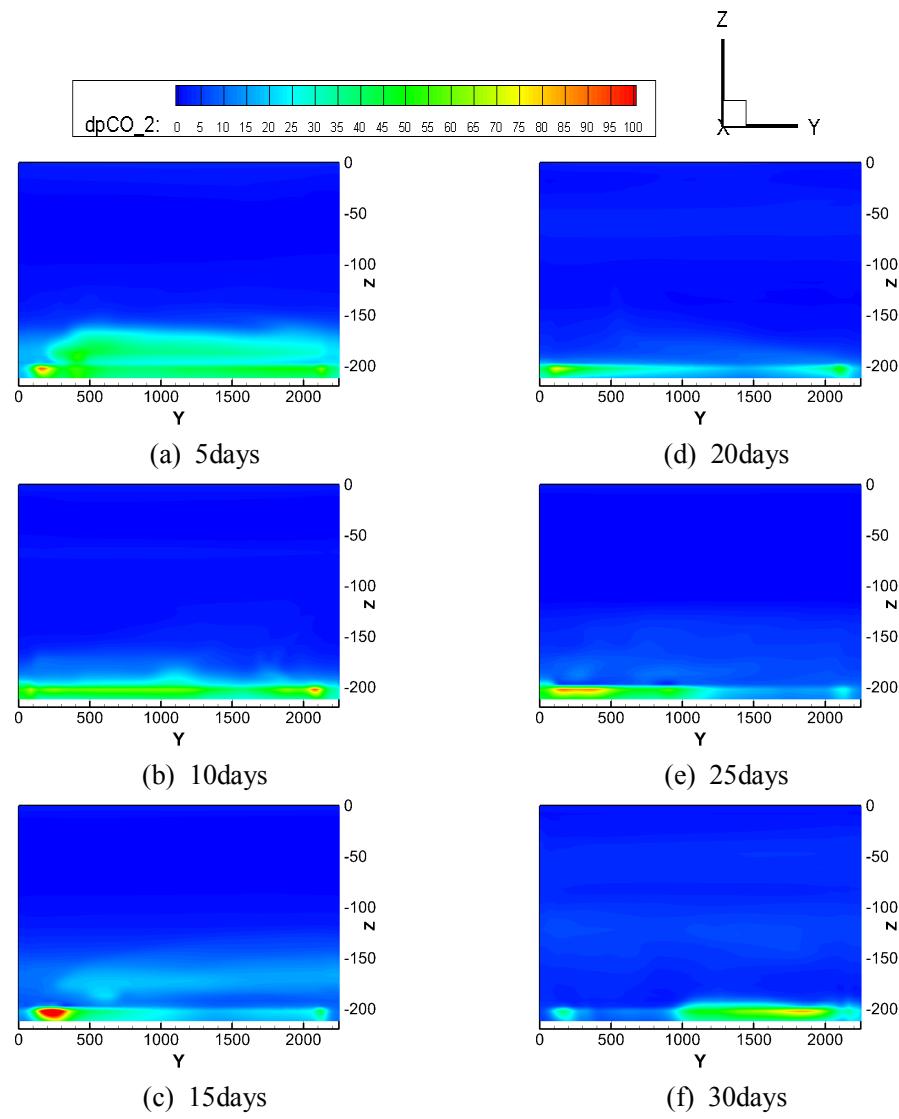


Fig. A.3-10 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point in yz-plane($x = 1,125m$) in small-scale region after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage (case 4, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

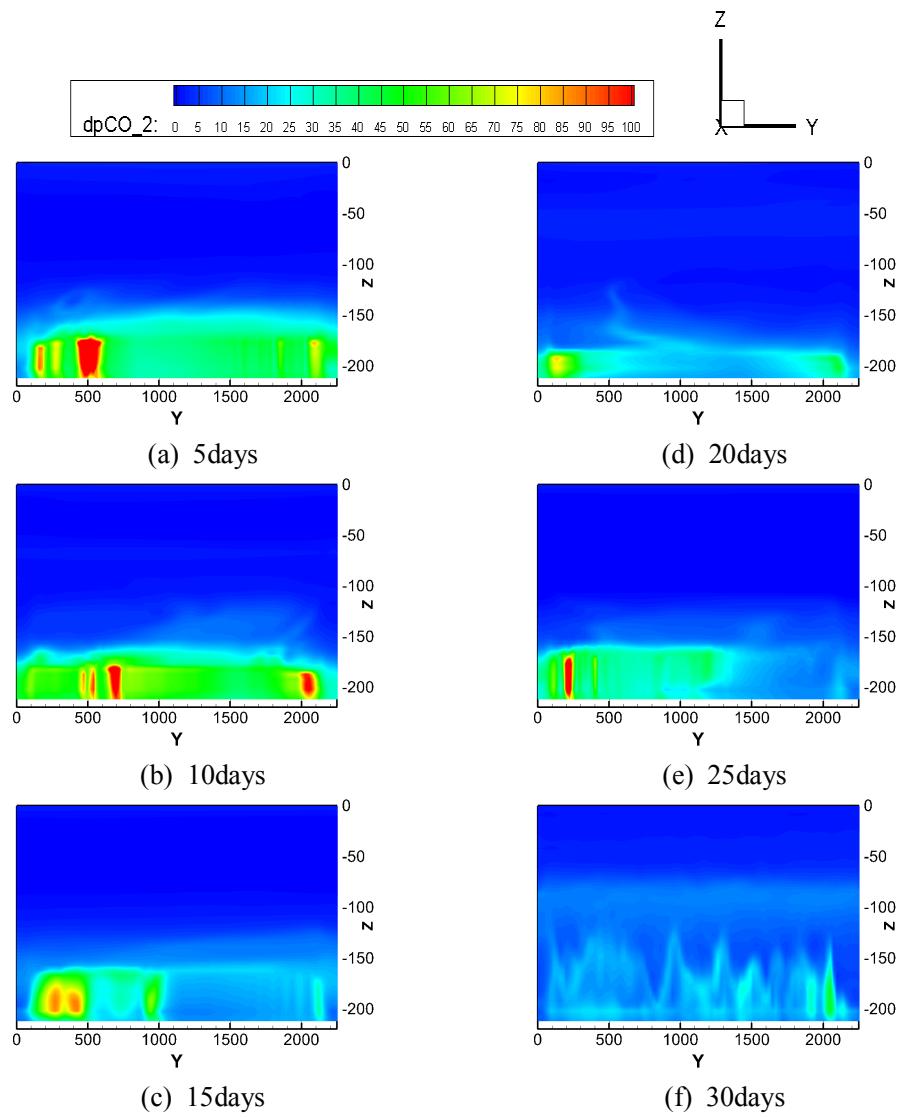


Fig. A.3-11 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
 in yz-plane($x = 1,125m$) in small-scale region
 after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
 (case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

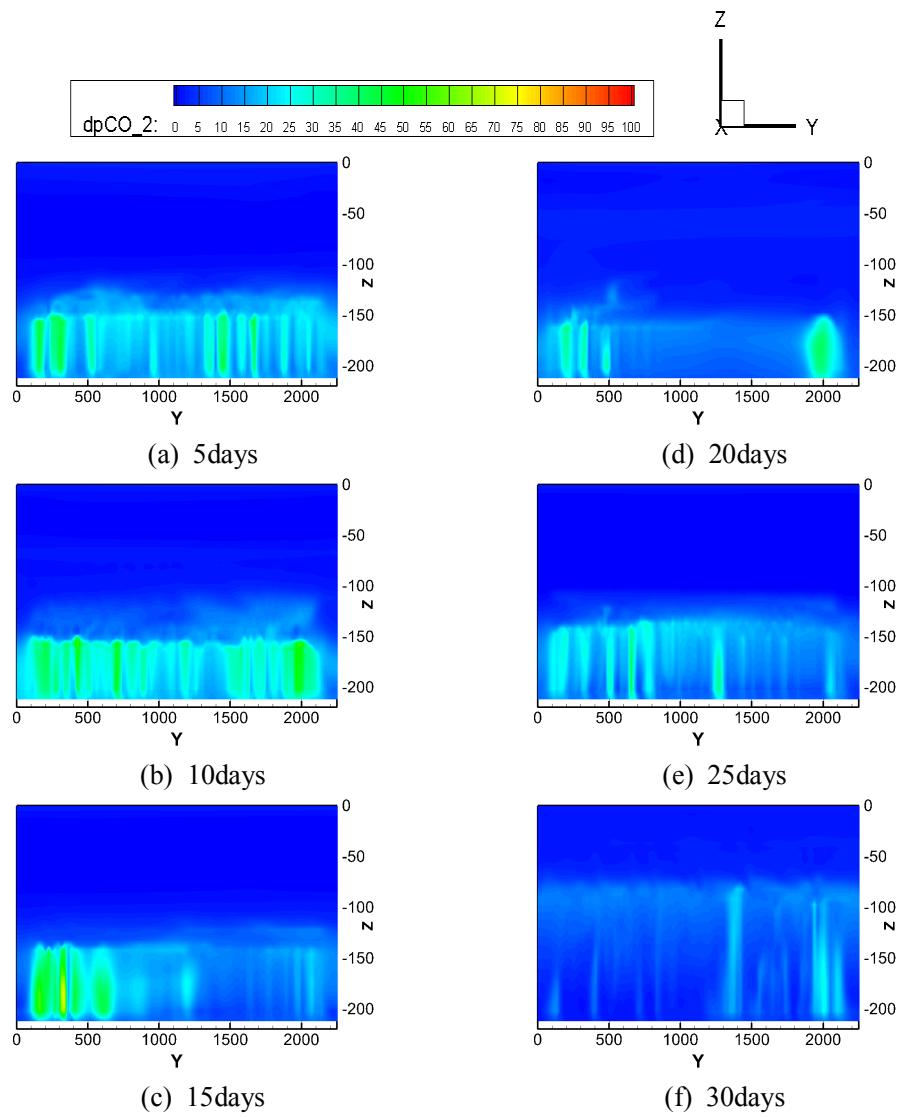


Fig. A.3-12 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in xz-plane($y = 1,125\text{m}$) in small-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

A.4 중규모 영역에서의 해수중 용해된 $\text{CO}_2(\text{DCO}_2)$ 변화량(ΔC)

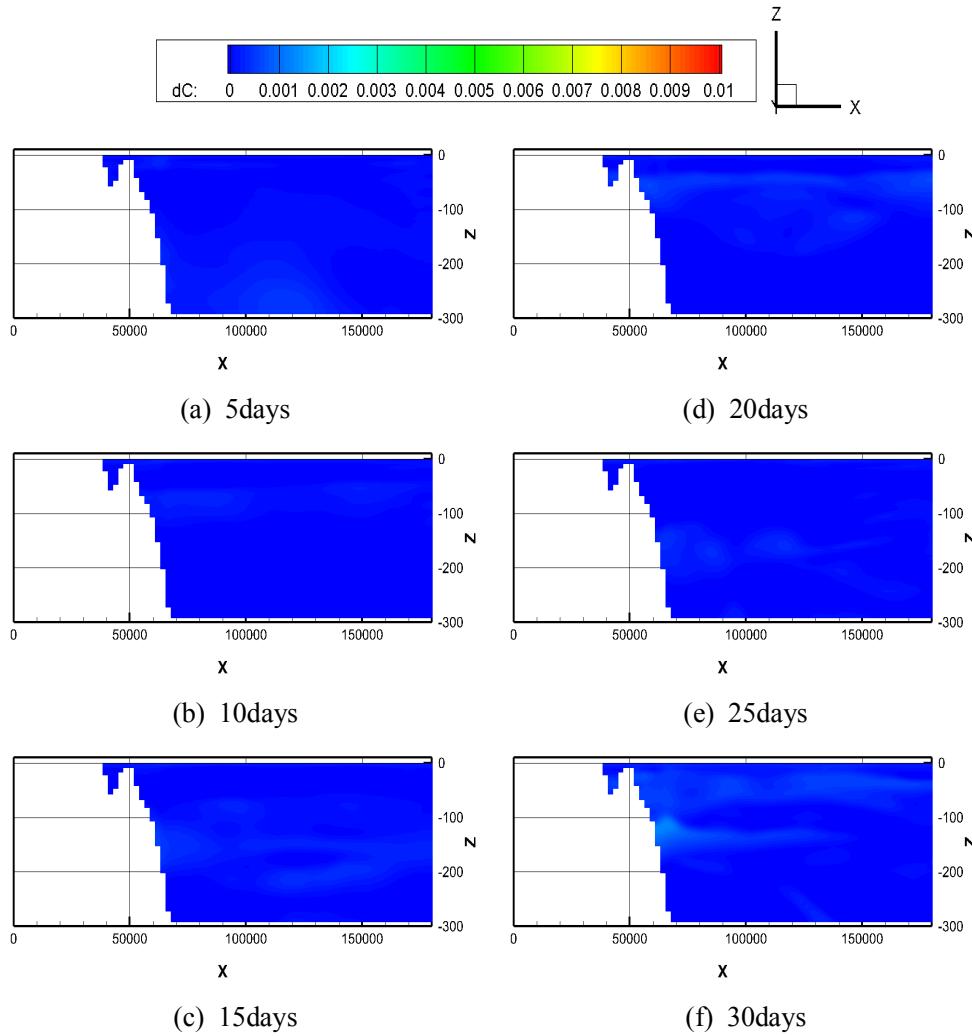


Fig. A.4-1 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz -plane($y= 108,000\text{m}$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

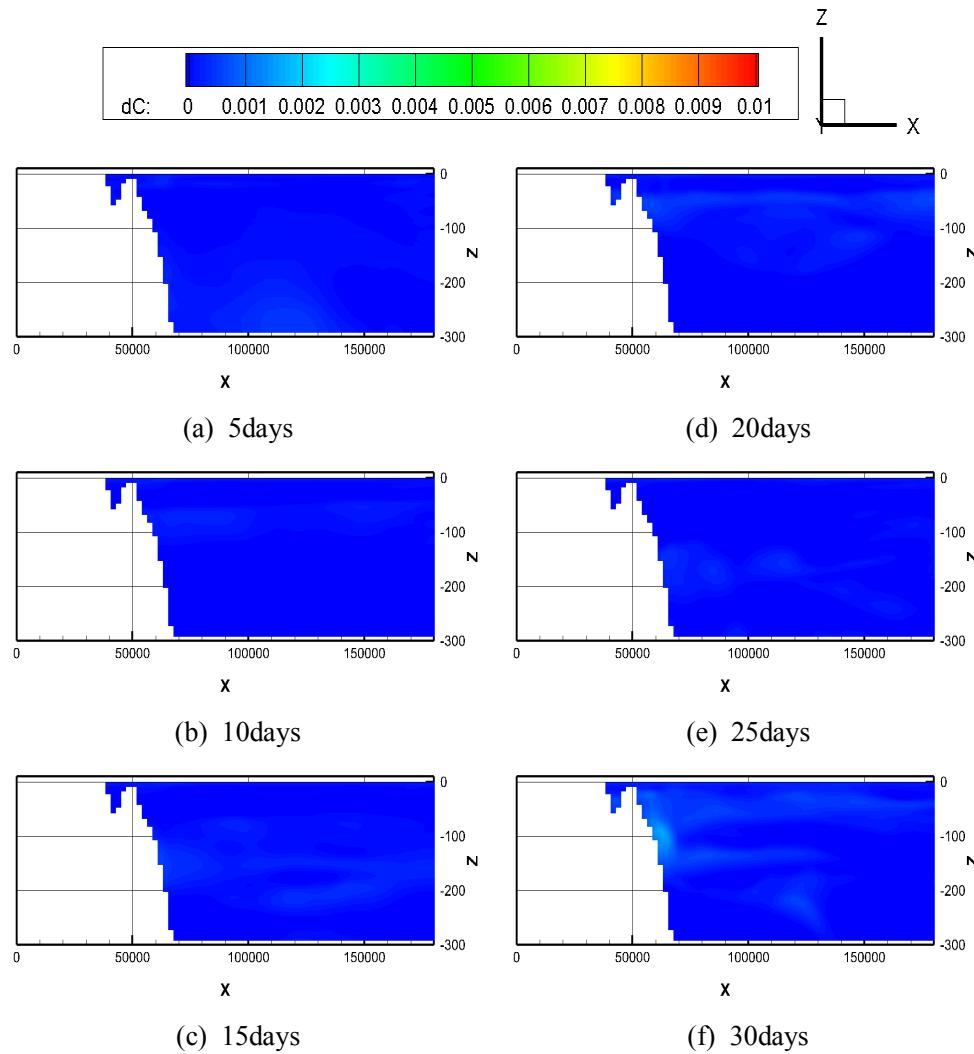


Fig. A.4-2 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

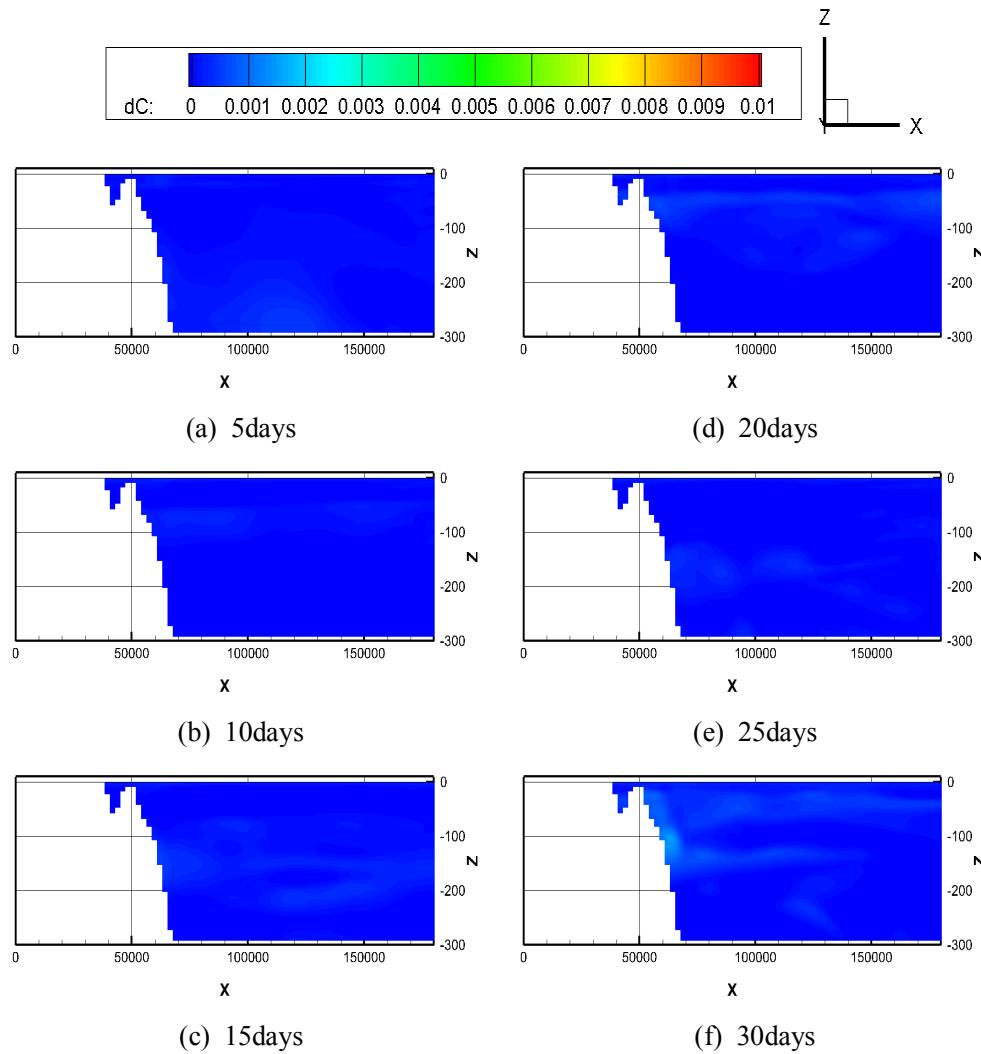


Fig. A.4-3 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

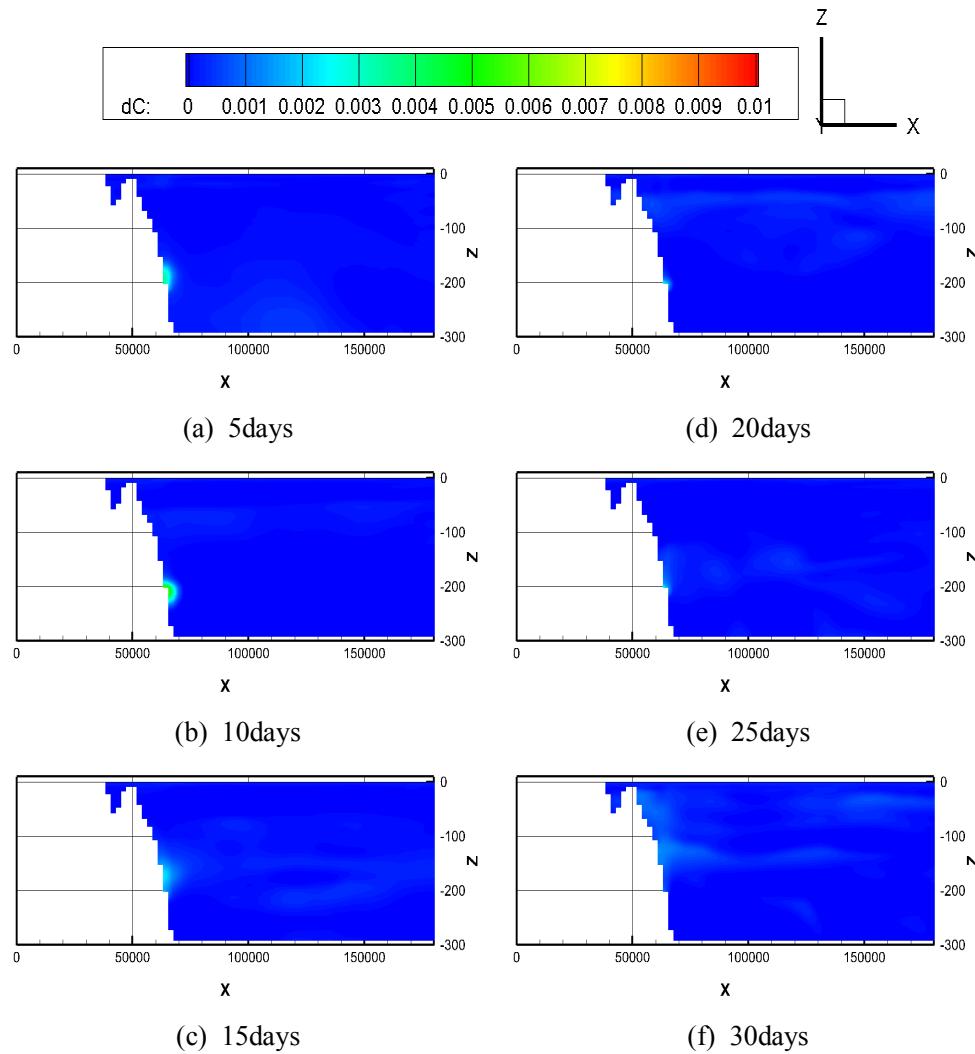


Fig. A.4-4 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

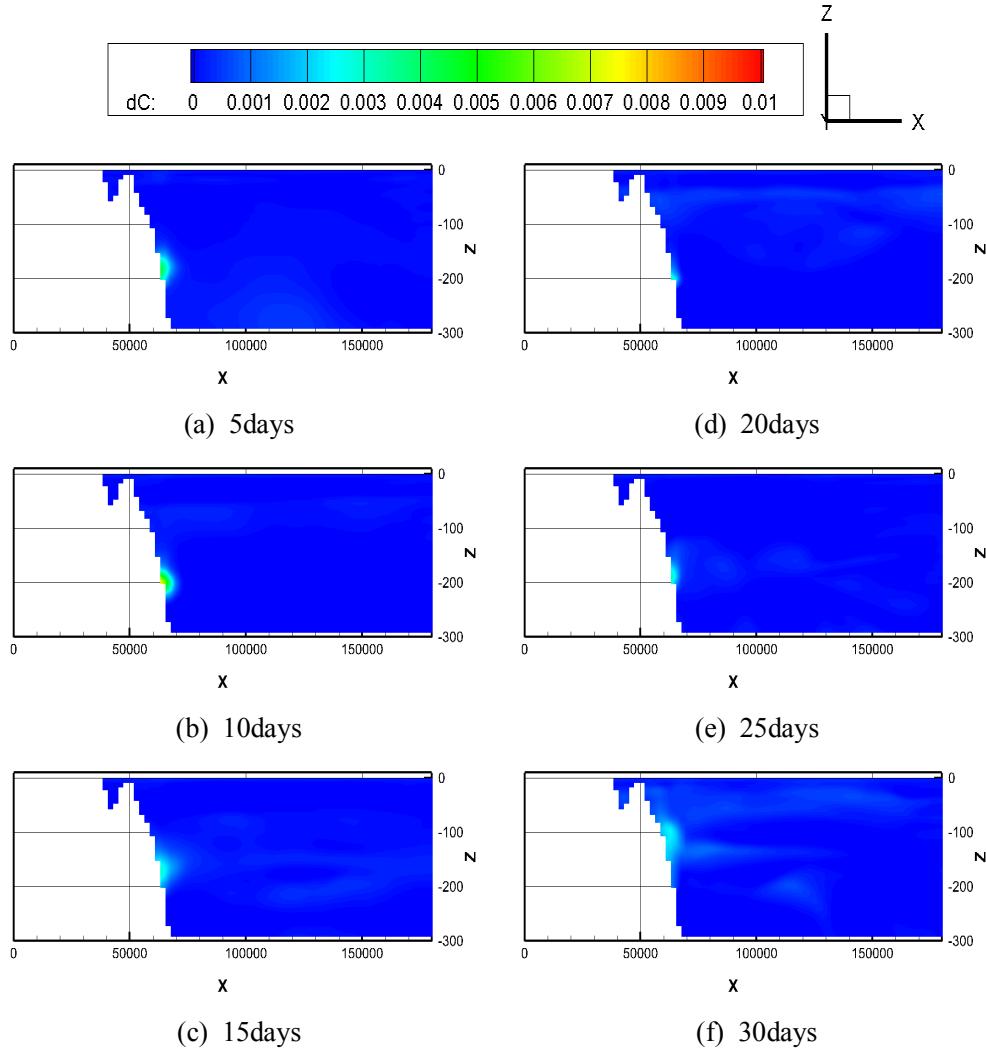


Fig. A.4-5 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

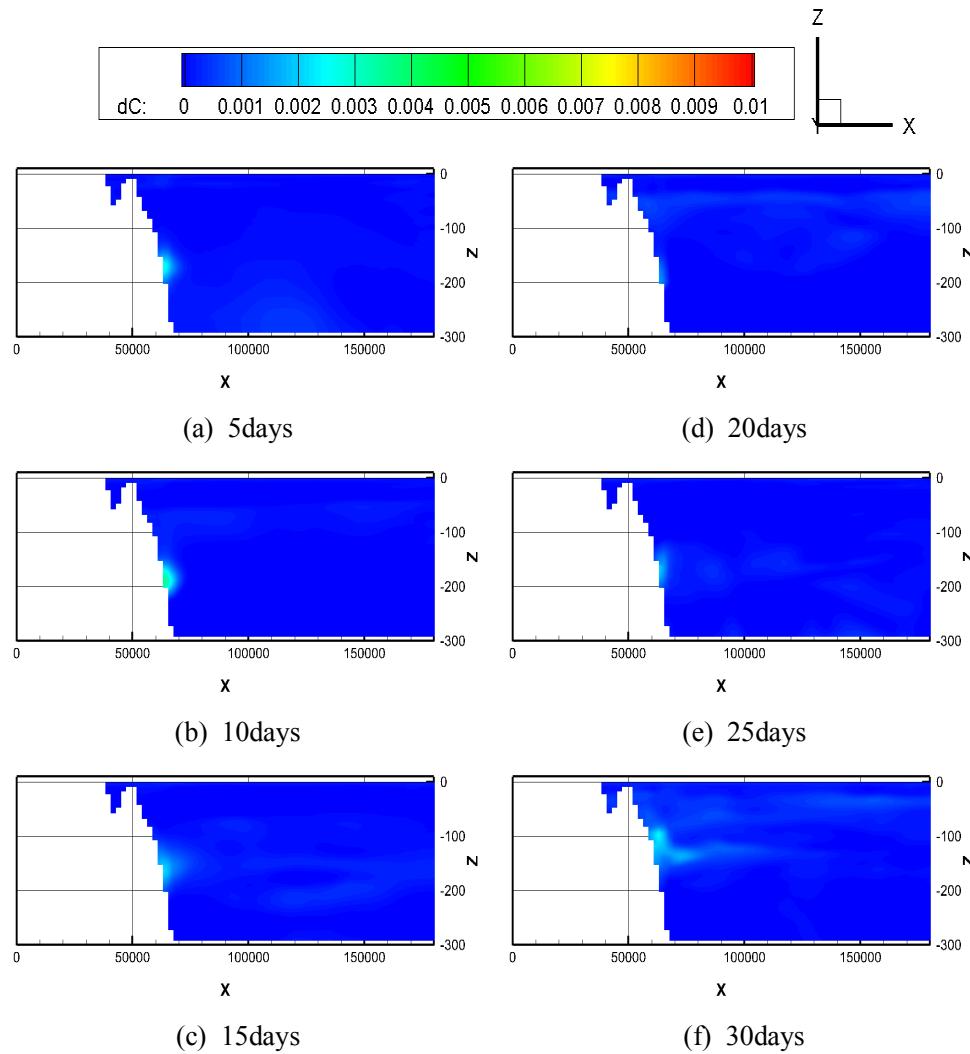


Fig. A.4-6 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

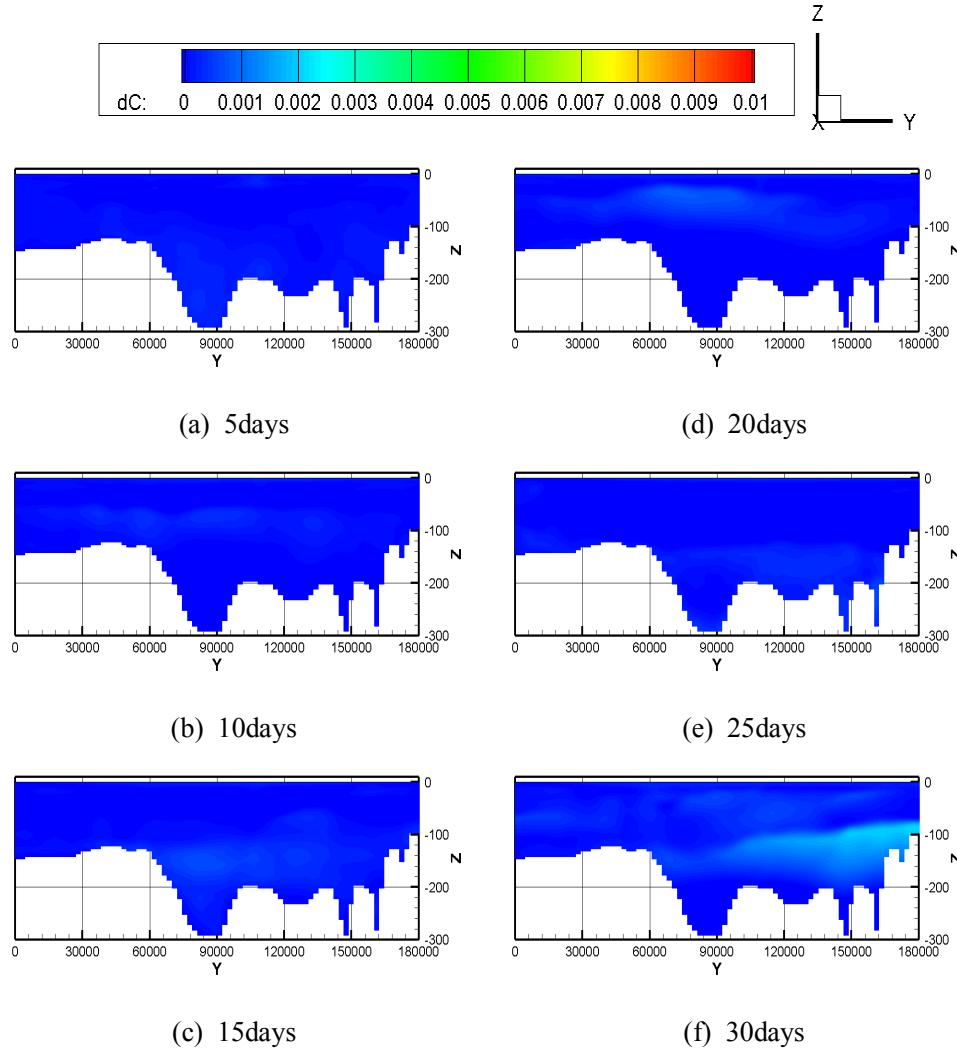


Fig. A.4-7 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
 in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) in meso-scale region
 after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
 (case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

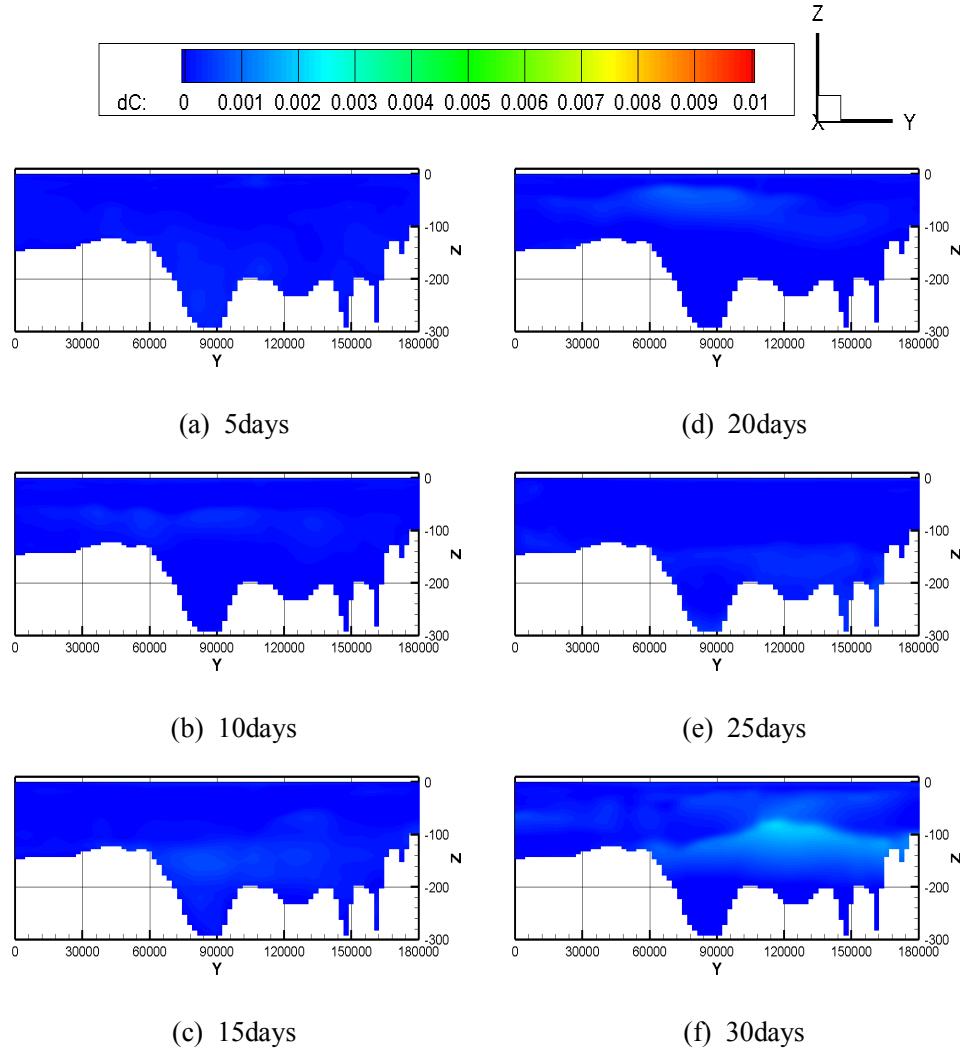


Fig. A.4-8 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point

in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 50%)

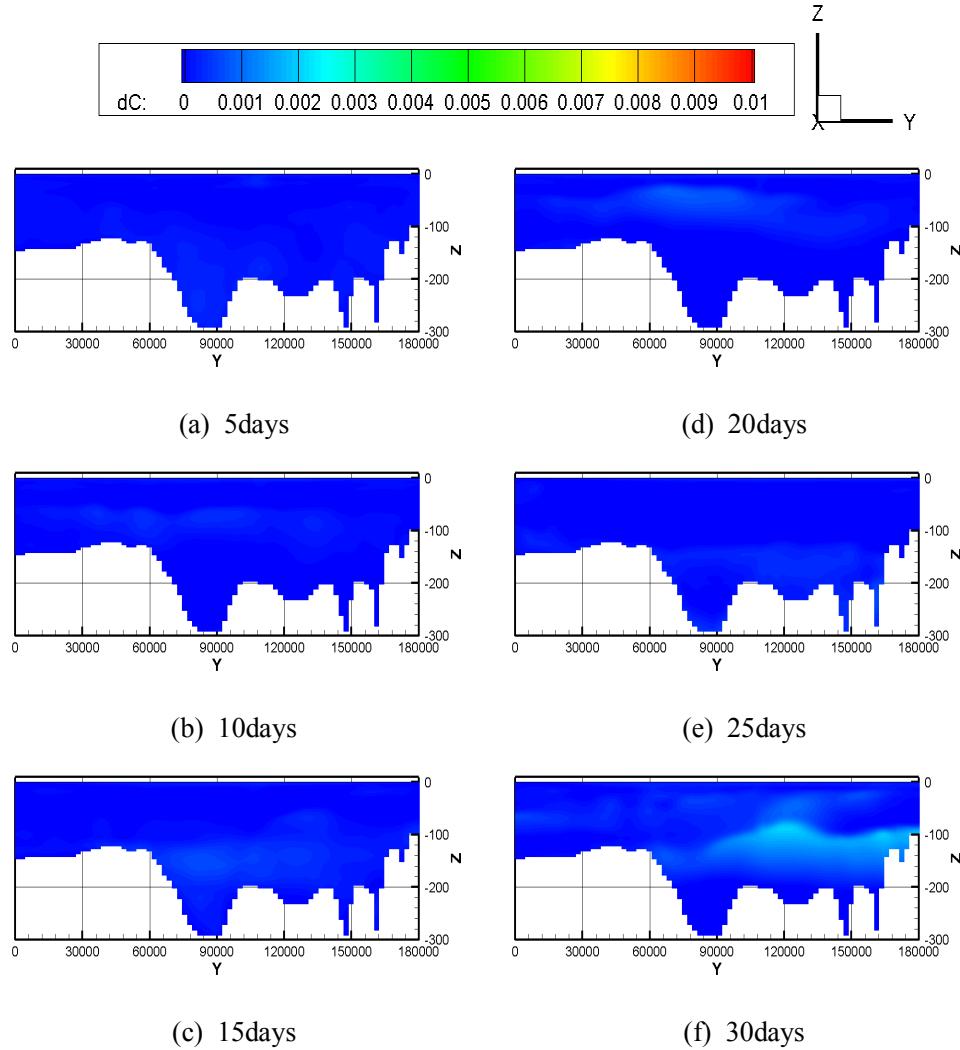


Fig. A.4-9 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point

in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 90%)

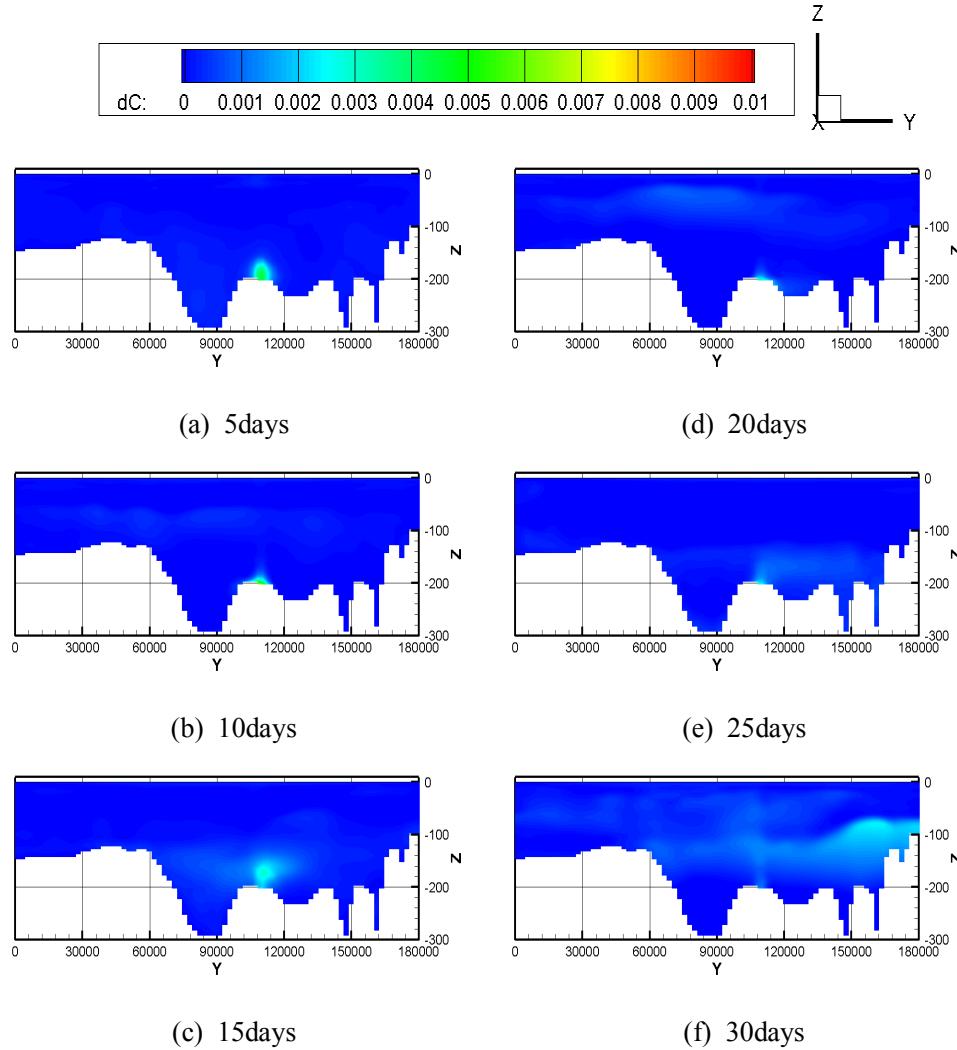


Fig. A.4-10 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point

in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

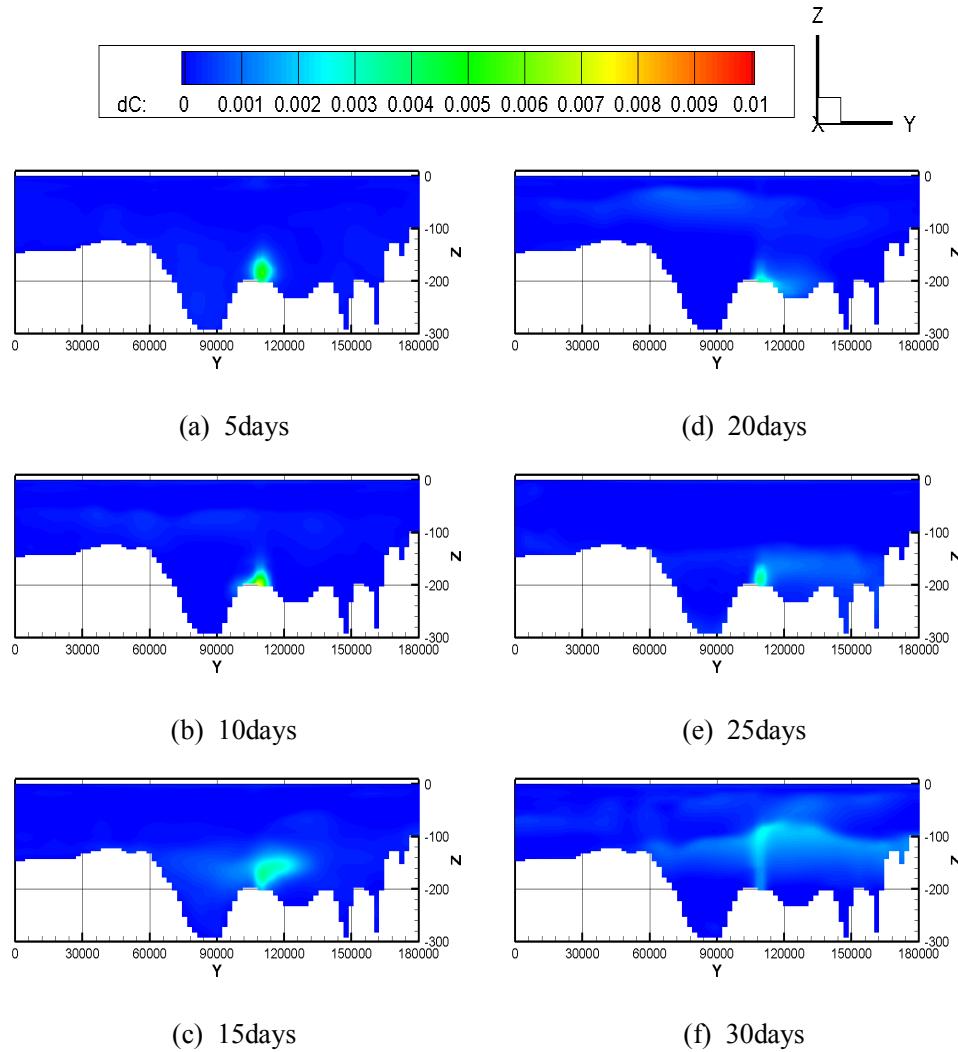


Fig. A.4-11 Contour maps of ΔDC_{CO_2} including leakage point

in yz-plane($x = 63,000m$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

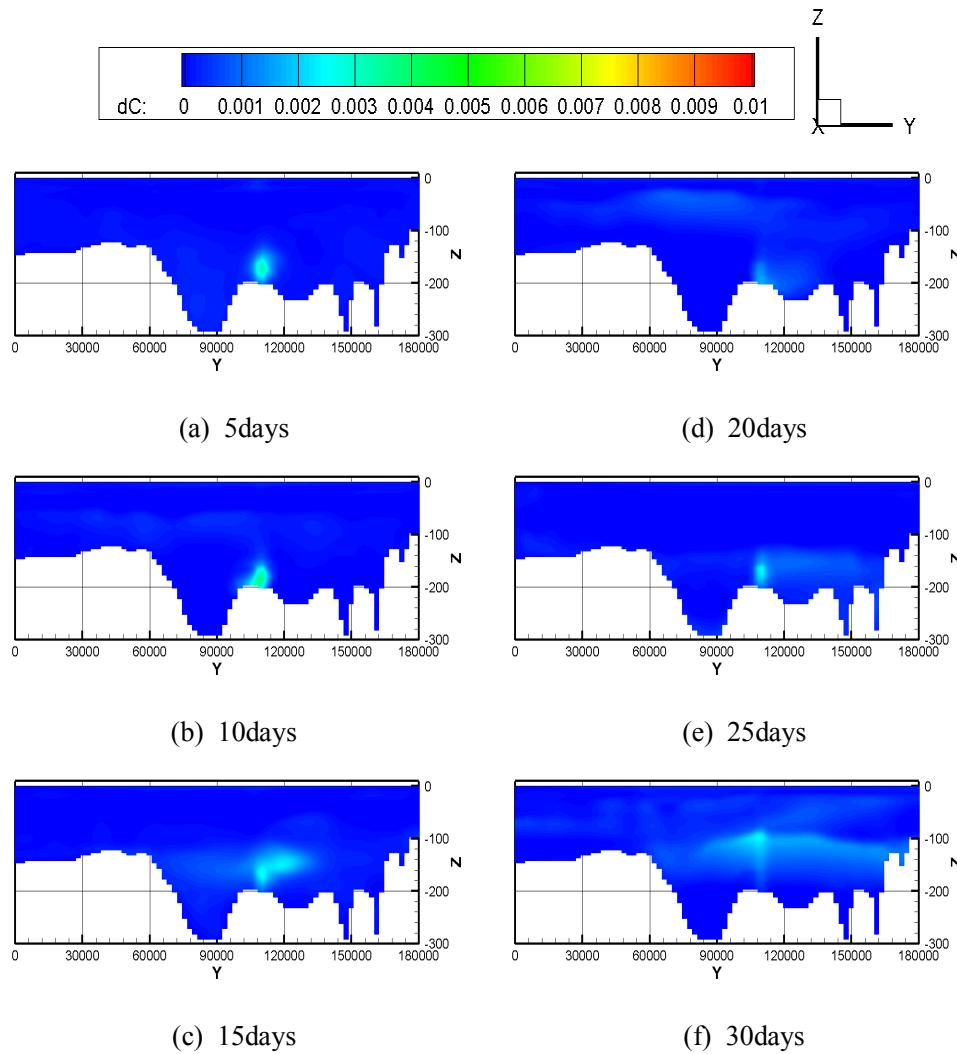


Fig. A.4-12 Contour maps of ΔDCO_2 including leakage point
 in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) in meso-scale region
 after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
 (case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

A.5 중규모 영역에서의 CO₂ 분압(pCO₂) 변화량 $\Delta p\text{CO}_2$

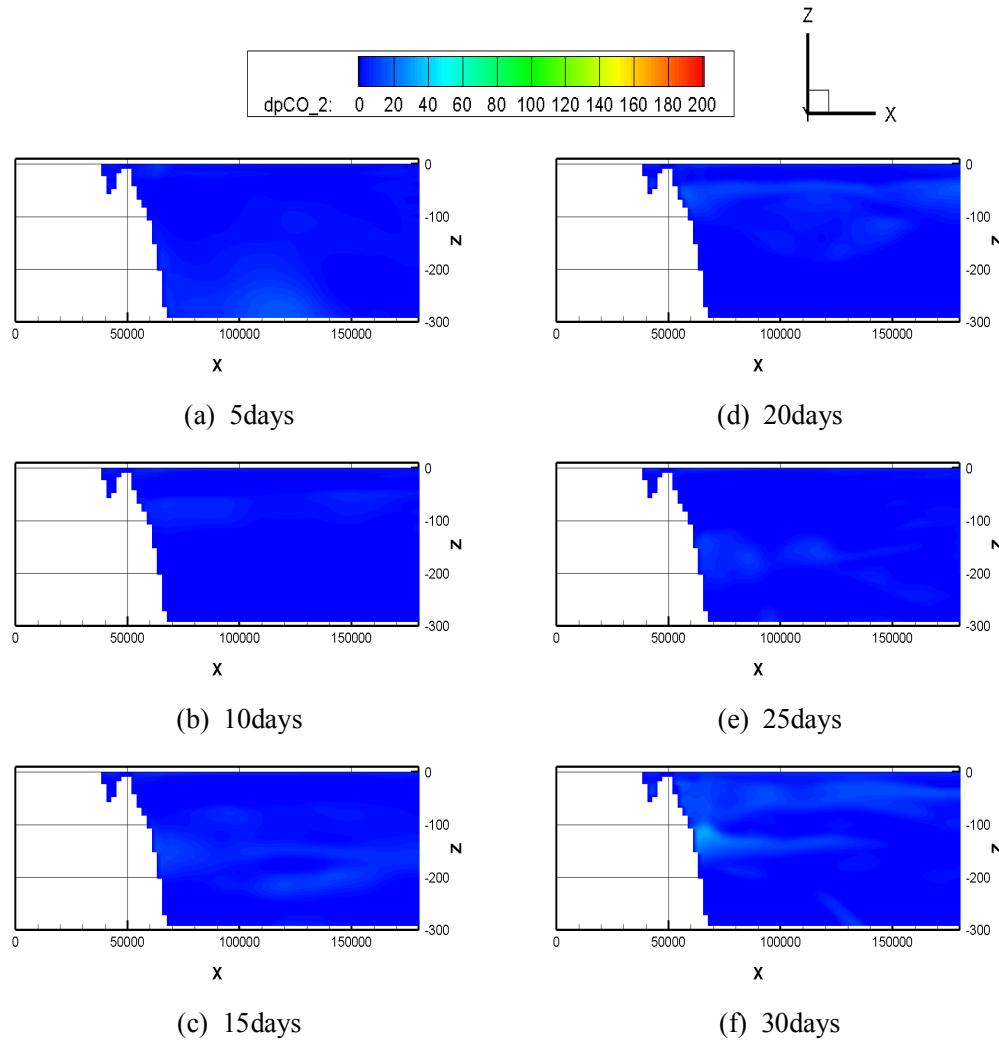


Fig. A.5-1 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point
in xz-plane($y = 108,000\text{m}$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 1, 3,800ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

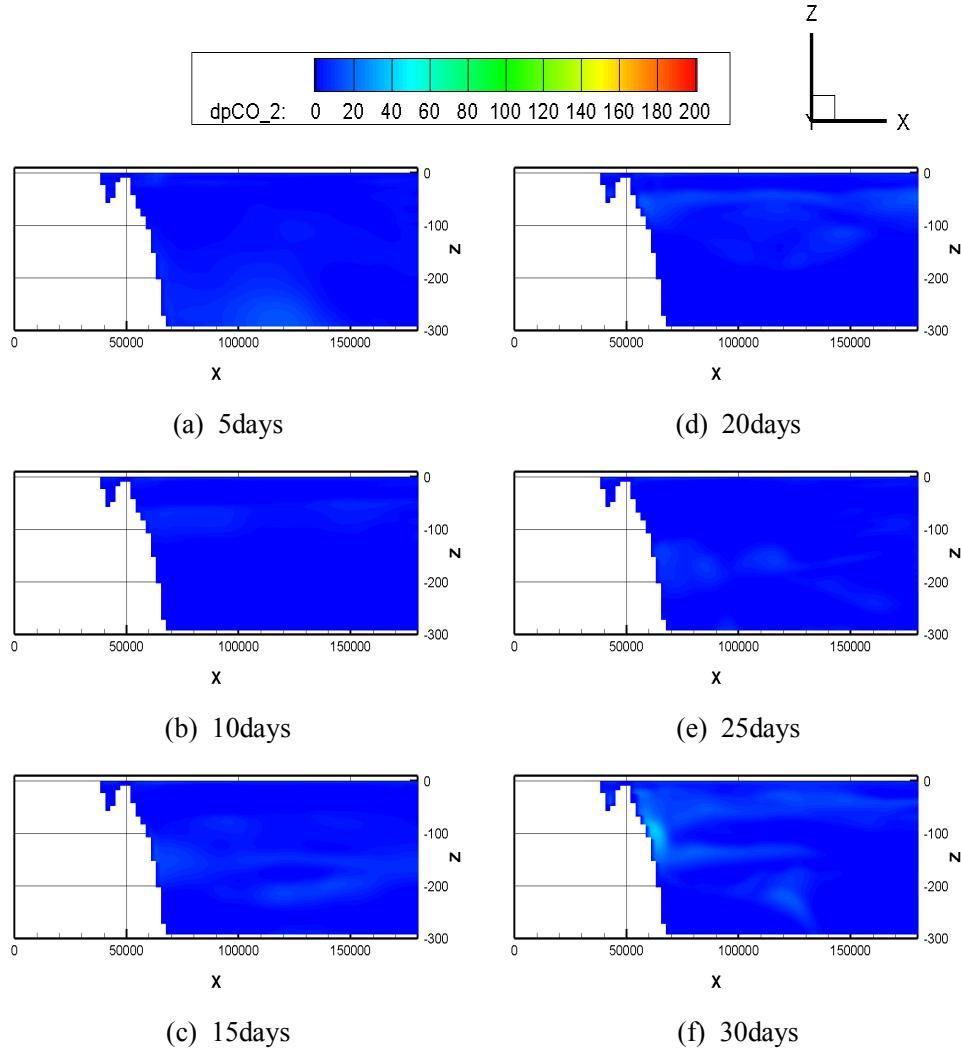


Fig. A.5-2 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point

in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

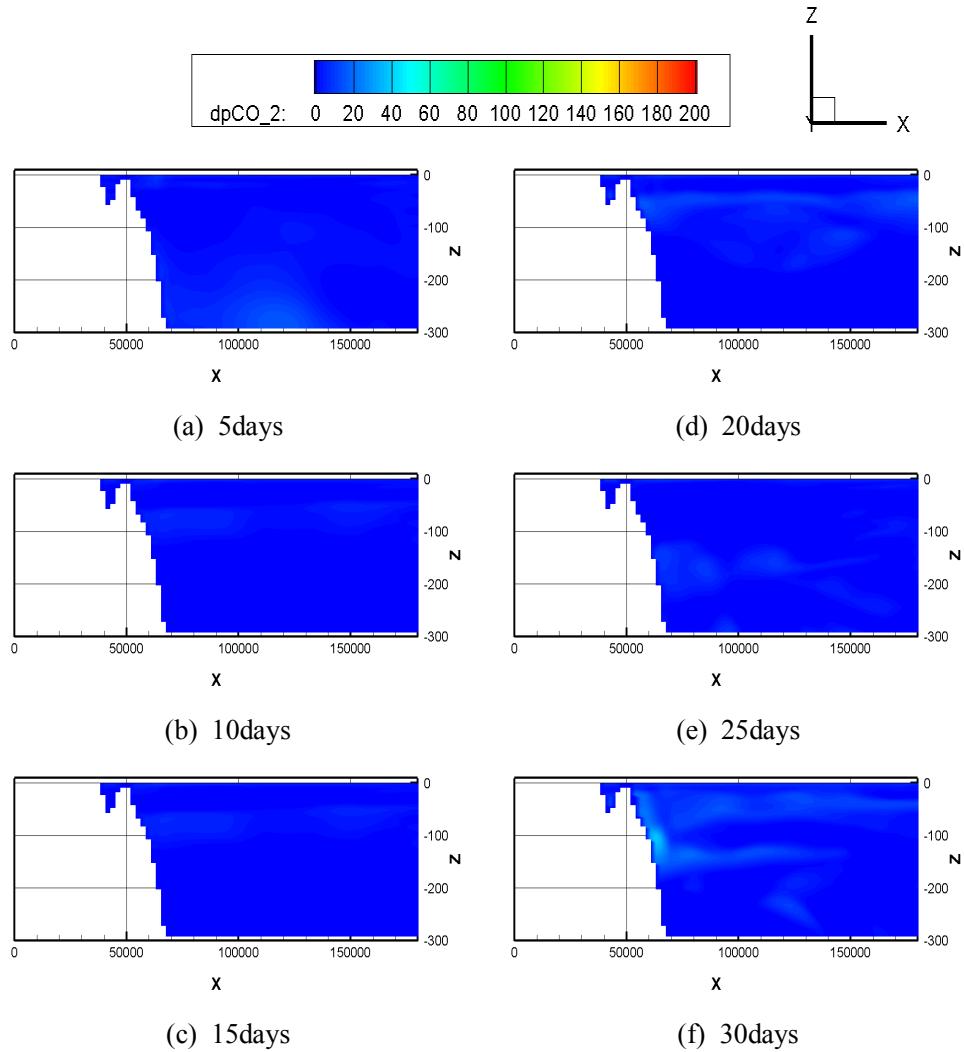


Fig. A.5-3 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point
in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

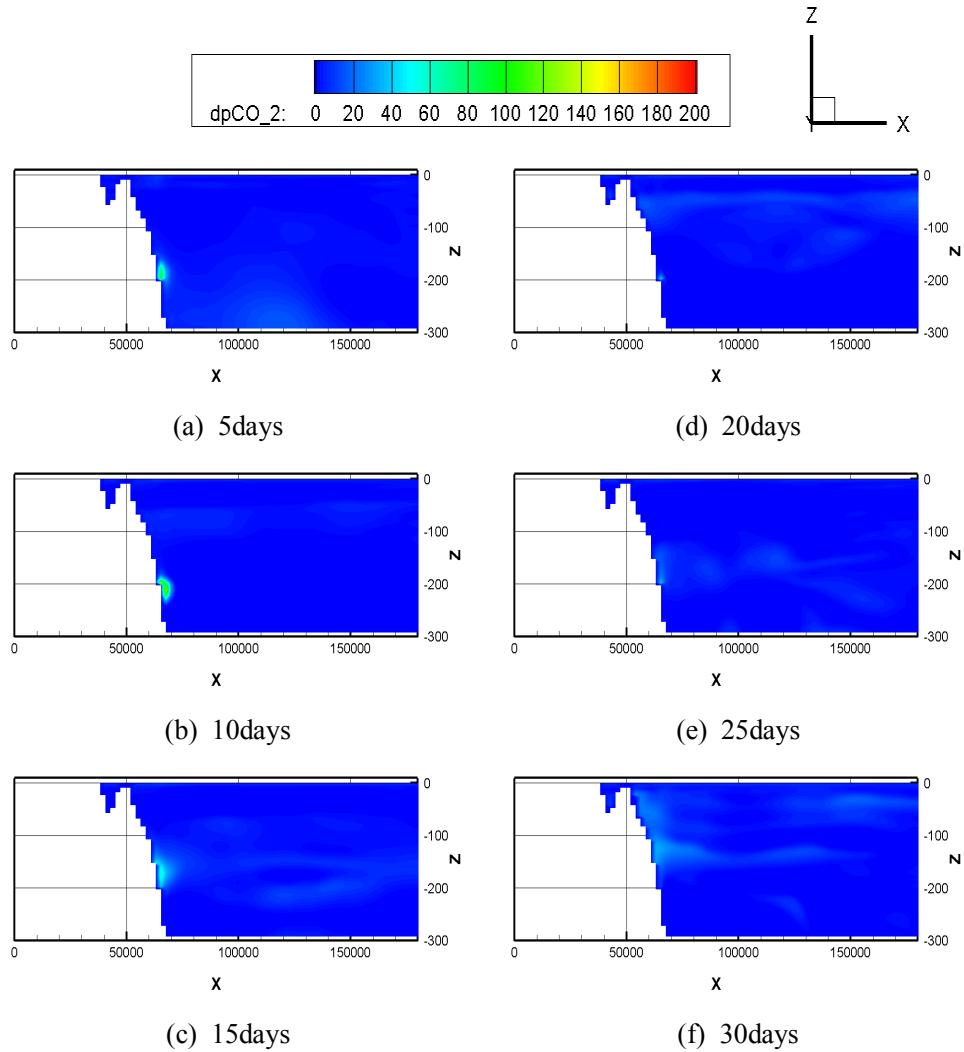


Fig. A.5-4 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 4, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

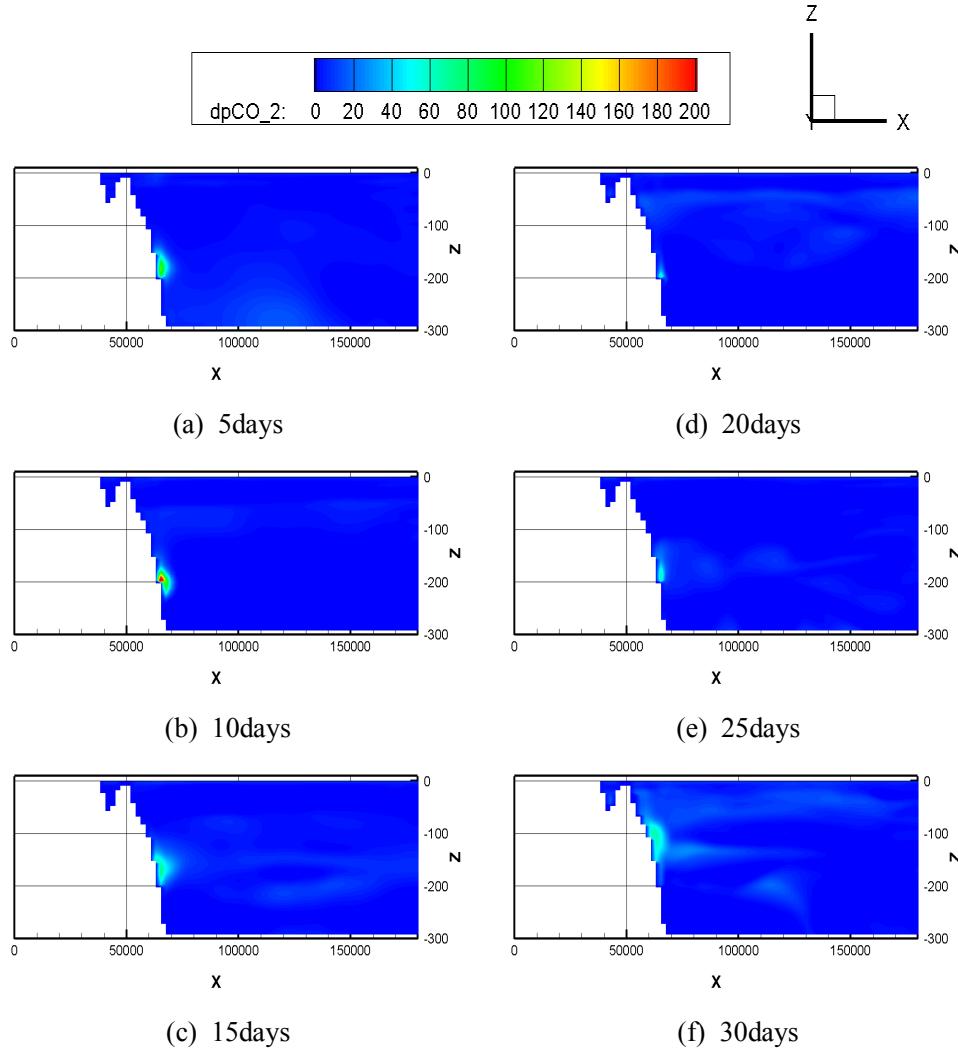


Fig. A.5-5 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in xz-plane($y= 108,000m$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 5, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

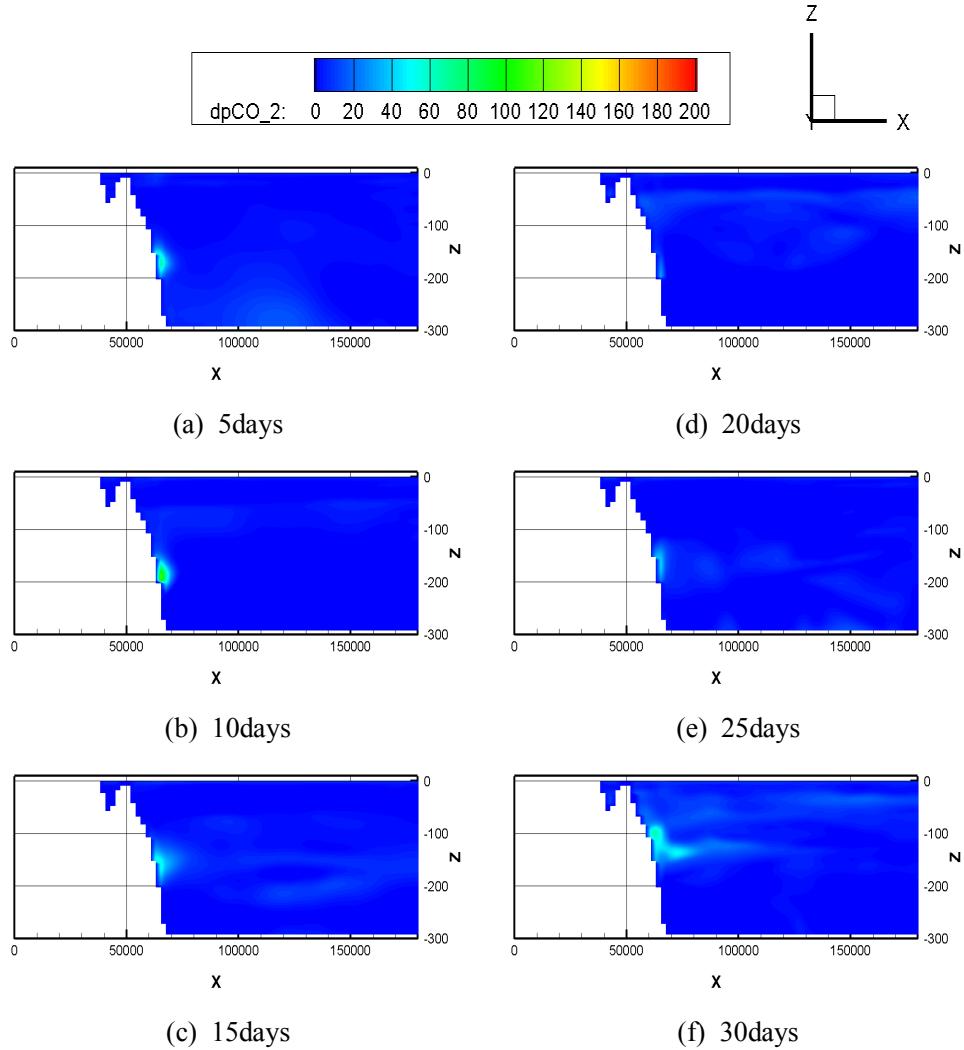


Fig. A.5-6 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in xz-plane($y = 108,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 6, 94,600ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

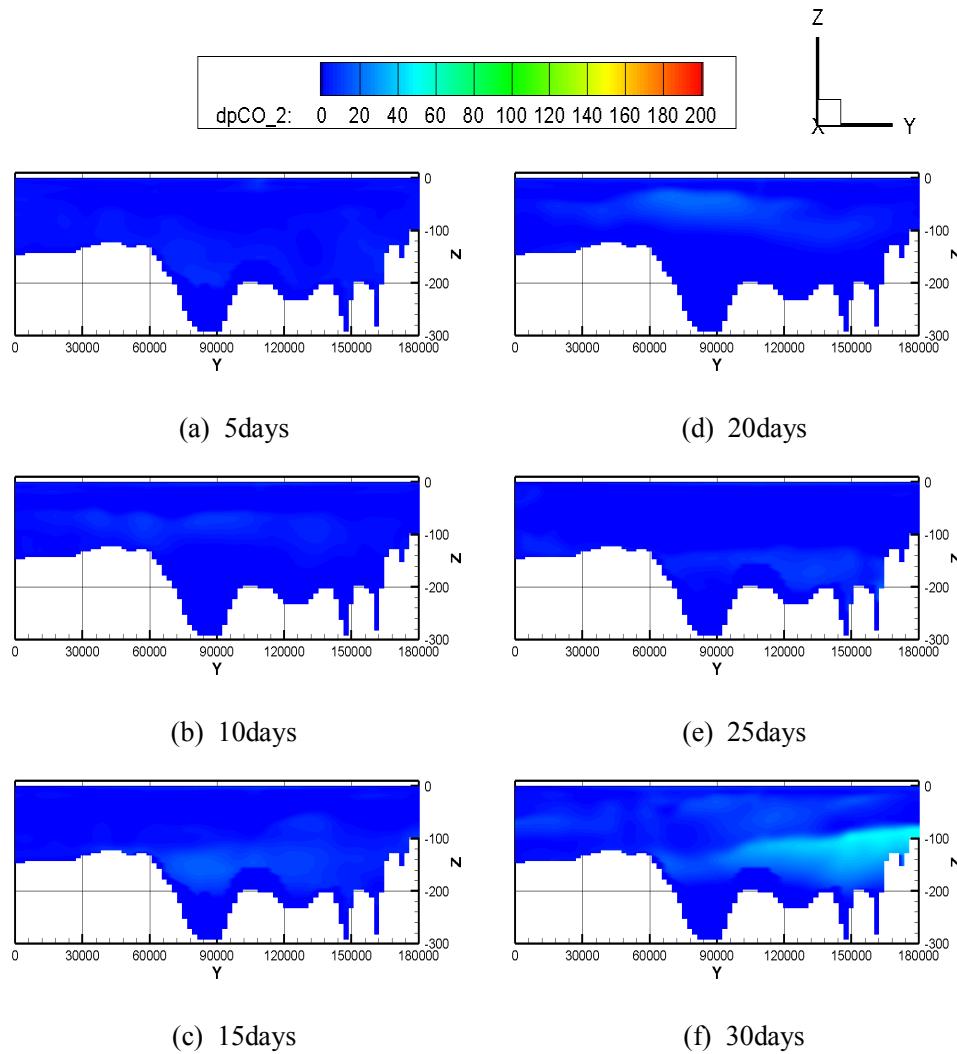


Fig. A.5-7 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
 in yz-plane($x = 63,000m$) in meso-scale region
 after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
 (case 1, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 10%)

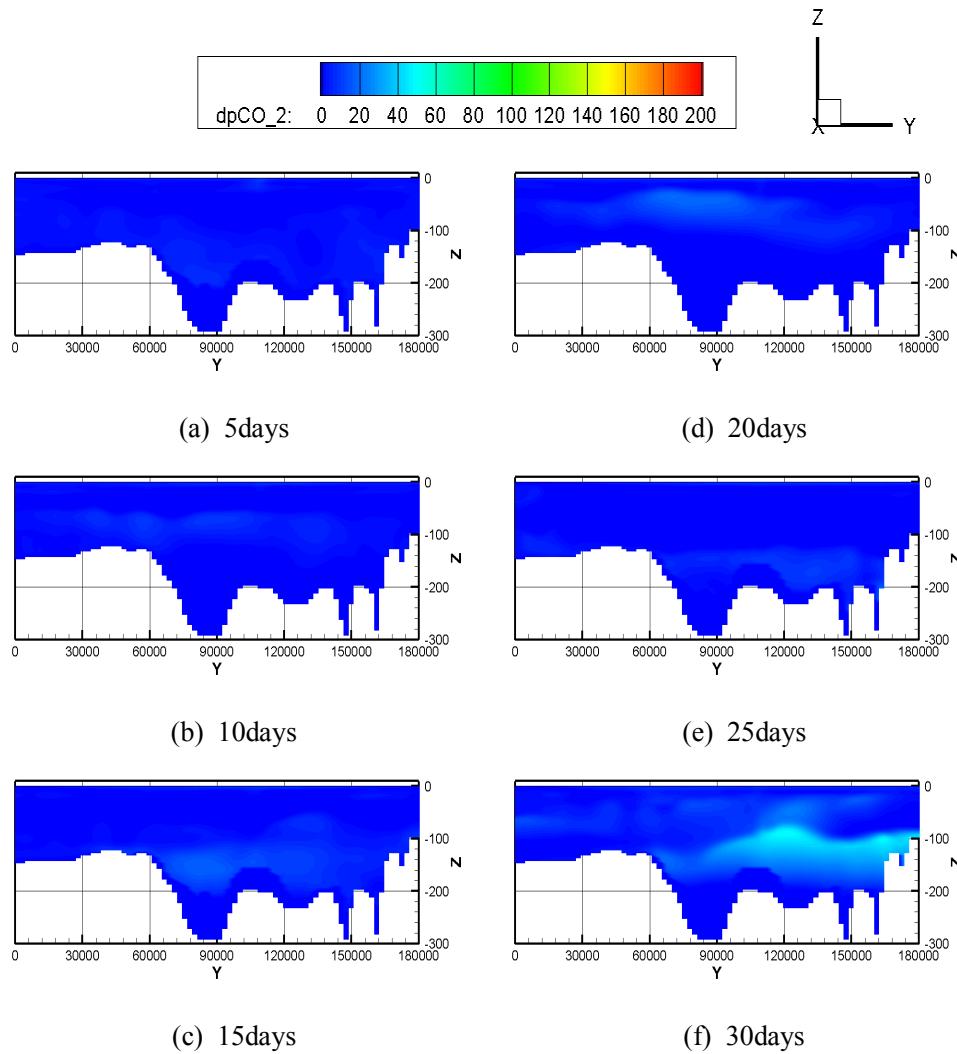


Fig. A.5-8 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point
in yz-plane($x = 63,000m$) in meso-scale region
after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 2, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 50%)

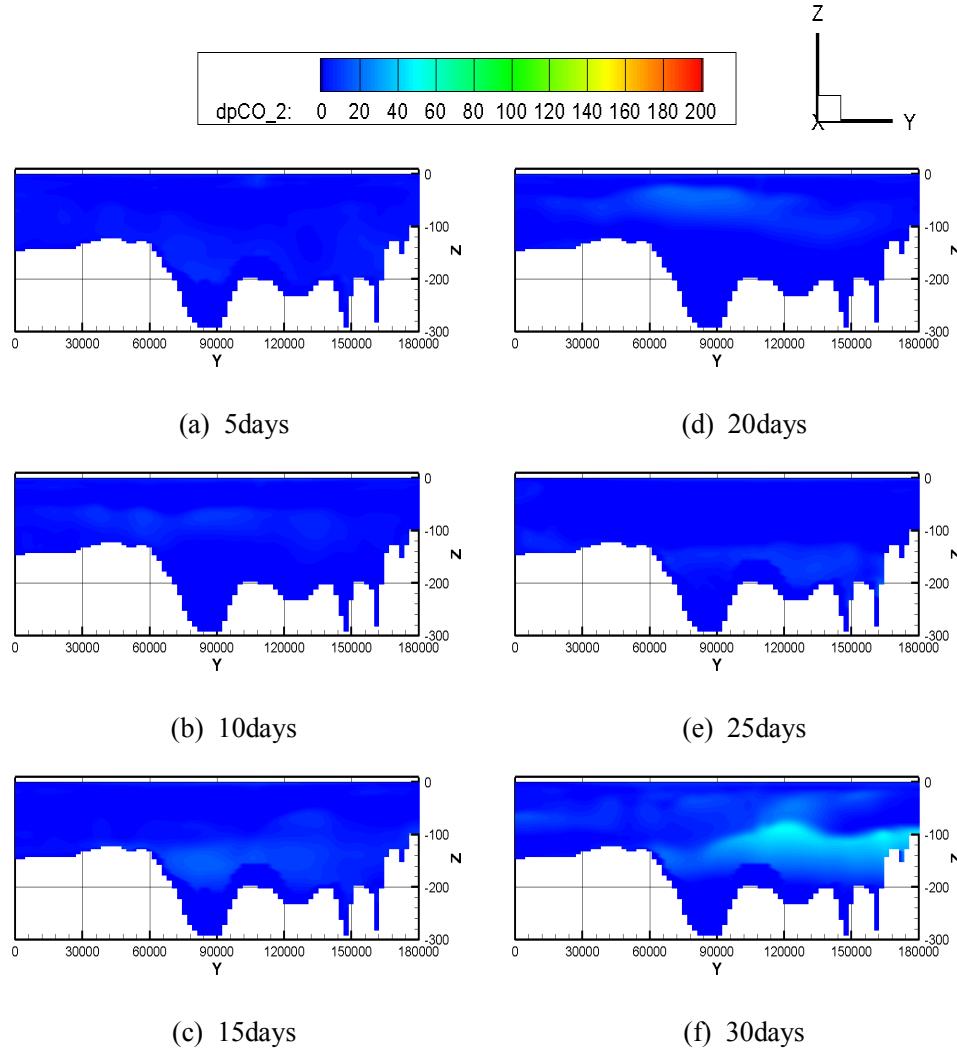


Fig. A.5-9 Contour maps of Δp_{CO_2} including leakage point

in yz-plane($x = 63,000m$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO_2 leakage
(case 3, 3,800ton/year, CO_2 bubble ratio 90%)

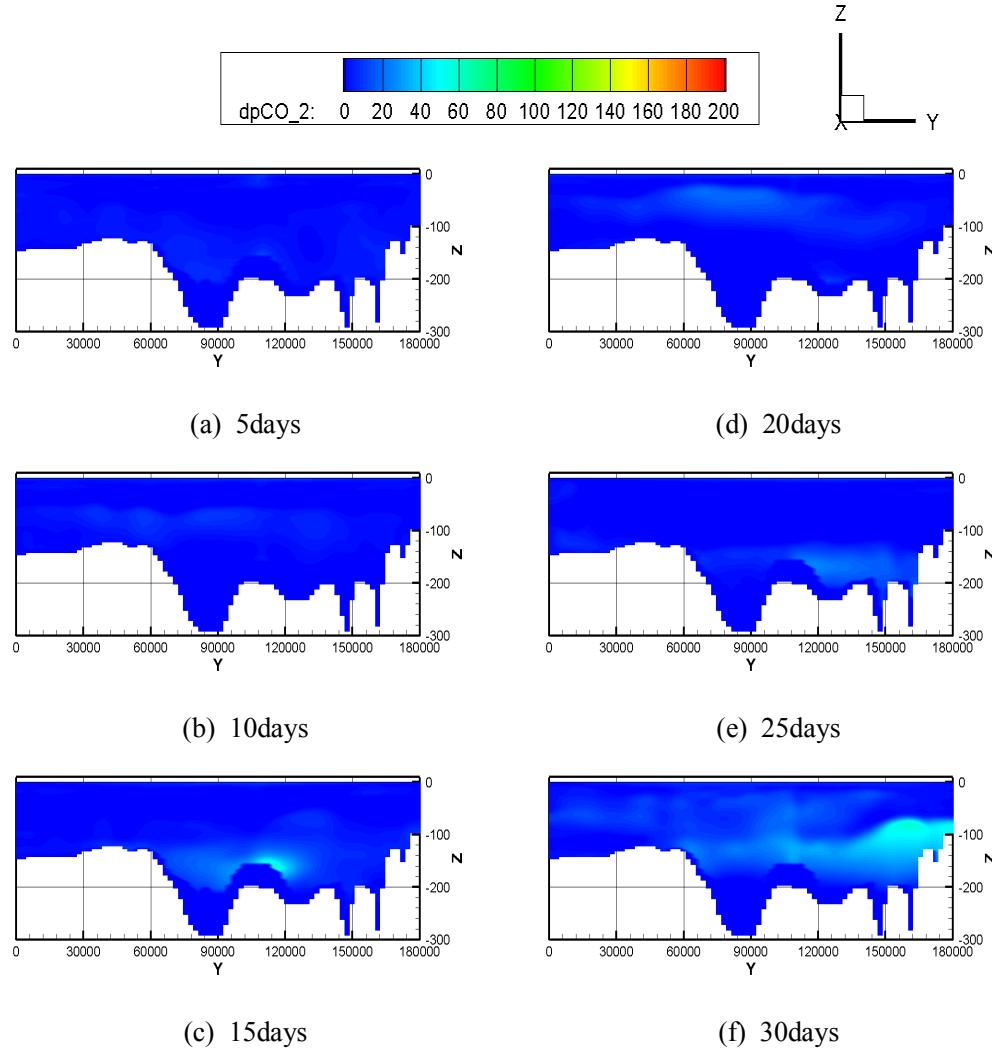


Fig. A.5-10 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point
in yz-plane(x= 63,000m) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 4, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 10%)

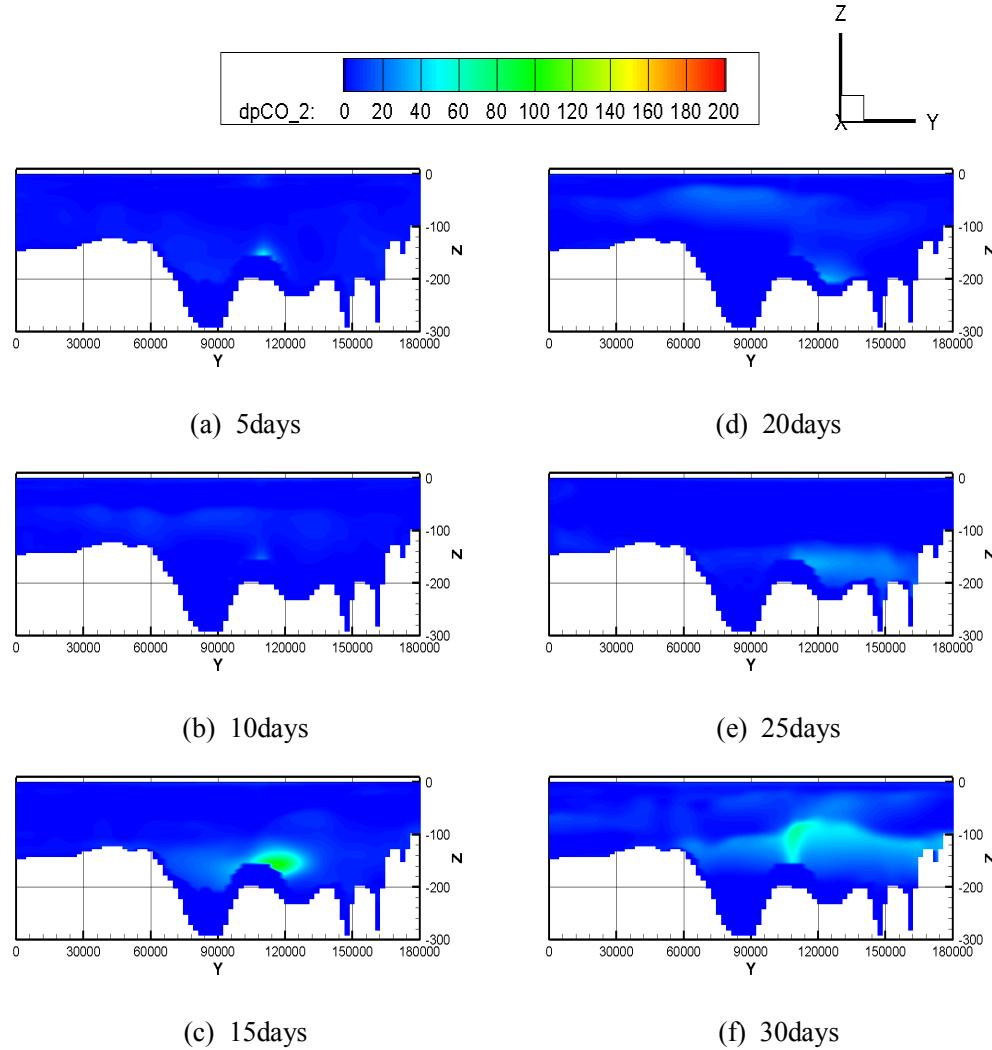


Fig. A.5-11 Contour maps of $\Delta p\text{CO}_2$ including leakage point
in yz-plane($x = 63,000\text{m}$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
(case 5, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 50%)

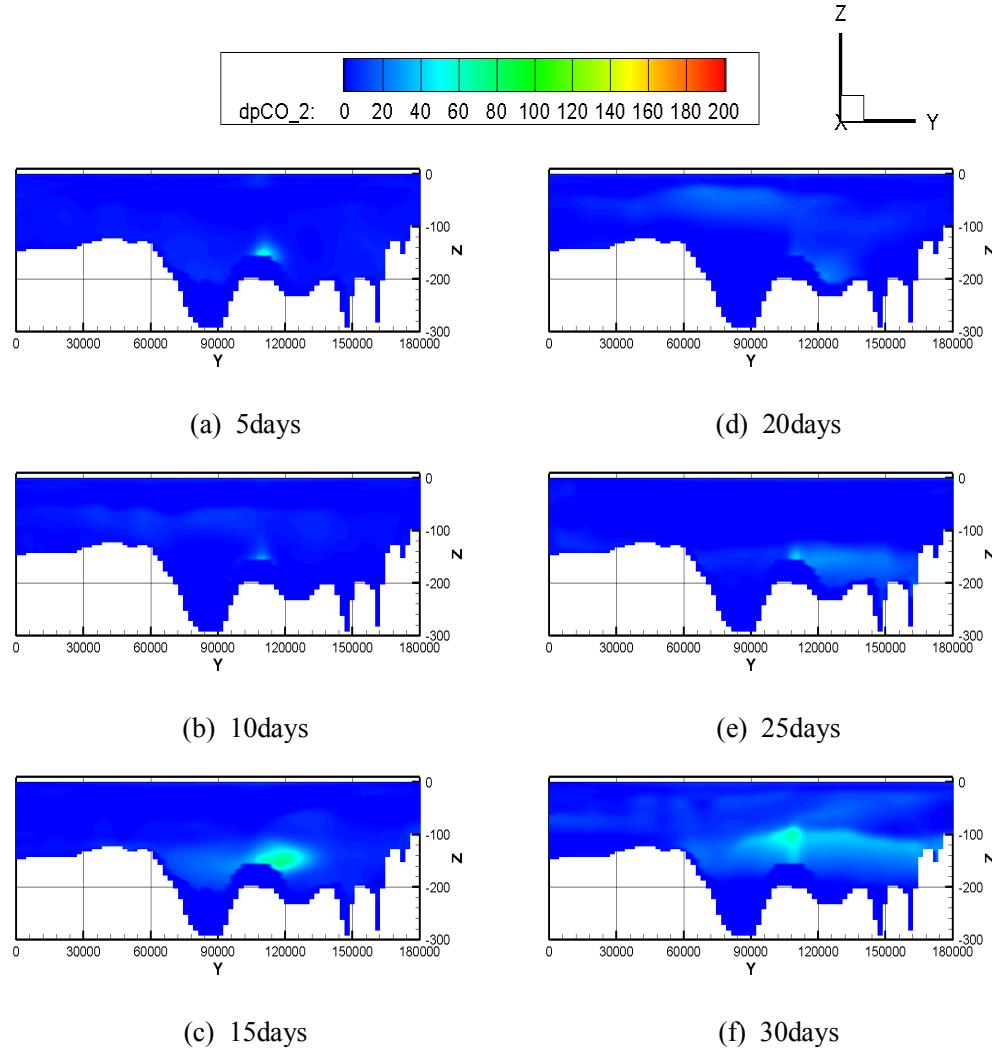


Fig. A.5-12 Contour maps of ΔpCO_2 including leakage point in yz -plane($x = 63,000m$) in meso-scale region

after (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 days of CO₂ leakage
 (case 6, 94,600ton/year, CO₂ bubble ratio 90%)