

일본 큐슈 구마모토 지역의 지하수 관리

Groundwater management in the Kumamoto region, Kyushu, Japan



정 상 옥 | 교수, 경북대학교 농업토목공학과, sochung@knu.ac.kr

1. 서론

구마모토현은 일본 큐슈지방의 좌측 중앙부에 위치하며, 우측은 남북으로 이어지는 큐슈산맥을 경계로 하고 좌측은 有明海에 접하고 있으며, 면적은 7,404km² 이고 2000년말 현재 인구는 1,865천명이다. 구마모토 지역은 구마모토현에서 지하수자원 관리를 위하여

1,042.2km²의 면적에 설정한 구역으로 구마모토현의 중서부 지역에 있으며 16개 市町村(2개 市, 12개 町, 2개 村)으로 구성되어 있으며, 구마모토시가 가장 넓은 226.2km²을 차지하고 있다(그림 1). 구마모토 지역의 동쪽은 아소화산 분화구이고, 서쪽은 바다와 접해있는 구마모토 평야이며, 북쪽은 菊池川 연안의 菊鹿분지이고, 남쪽은 宇土山이다. 구마모토 지역은 화산쇄설물이

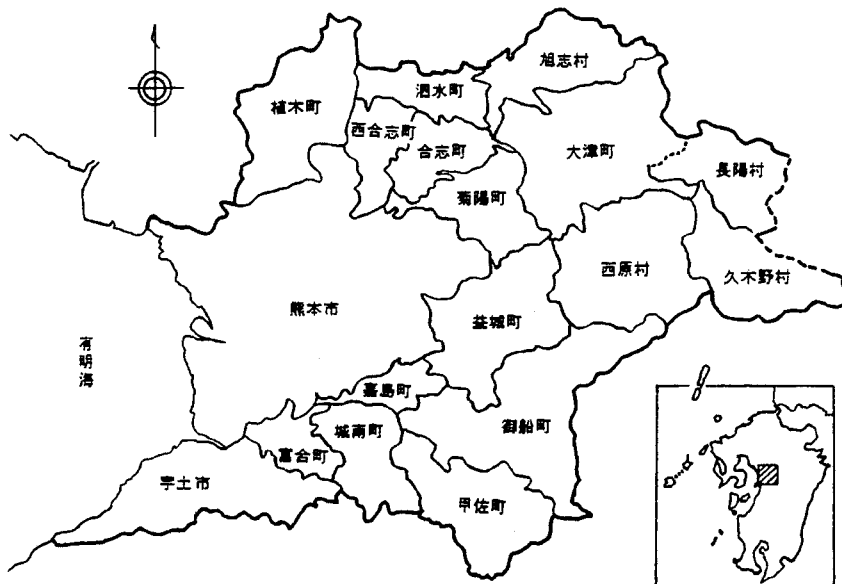


그림 1. 구마모토 지역의 위치도

퇴적된 지층으로 지하수자원이 풍부한 지역이며, 이 지역은 일본에서 도시용수를 100% 지하수로 사용하는 가장 넓은 지역이다.

구마모토 지역의 지하수위는 과거 30년 동안 지속적으로 저하하고 있다. 지방정부와 연구자들의 지속적인 관측결과에 따르면 이 지역의 지하수 유동량과 하류부의 용천수량도 지속적으로 줄어드는 것으로 나타났다. 이에 대한 주 원인은 농지, 특히 논 면적의 감소로 인한 지하수 충전량의 감소에 기인하는 것으로 조사되었다. 이에 대처하기 위하여 구마모토현과 구마모토시에서는 지하수자원의 효율적인 관리와 이용을 위하여 노력하고 있다. 본고에서는 구마모토 지역의 지하수자원의 효율적인 관리방안을 소개함으로써 관련분야의 학자와 공무원들에게 좋은 참고자료가 되었으면 하는 바램이다.

2. 지형, 지질, 토지이용

구마모토현은 동서로 폭이 약 60~70km이고 남북으로 길이가 약 110km로 남북방향으로 긴 장방형 모

양을 하고 있다. 구마모토 지역의 지형은 원형에 가까운 모양을 하고 있으며, 동쪽과 북쪽은 아소산과 다른 산들로 높은 산지를 형성하고 서쪽은 평야를 이루고 바다와 접해있다. 동쪽의 아소산에서 발원한 白川은 본 지역을 가로질러 서쪽으로 흘러 바다로 흘러가며, 본 지역의 남부에 있는 綠川은 지역의 동부 남쪽경계에서 북서쪽으로 흘러서 바다로 유입한다.

구마모토 지역의 지질 개요는 지역의 북서부, 서부 및 남동부는 변성암류가, 남부는 중고생대 퇴적암이 주된 제4기층 기반암이 분포하여 산지와 구릉지를 형성하고 있다. 제4기층의 주체인 아소화산 쇄설퇴적물이 기반암과 안산암류를 덮고 있으며, 광범위하게 퇴적된 대지(台地)부분은 화산 쇄설퇴적물로 형성되어 있다. 주하천 연안은 하천의 충적작용에 의하여 충적층이 분포하여 구마모토 평야부는 연약점토층이 두껍게 퇴적되어 있다.

구마모토 지역의 지층은 아소화산이 네 차례에 걸쳐 대폭발을 하여 형성된 네 개의 쇄설퇴적물층이 대수층을 형성하고 있다. 이 지역의 대수층은 그림 2와 같이 제1대수층과 제2대수층으로 구분된다. 제1대수

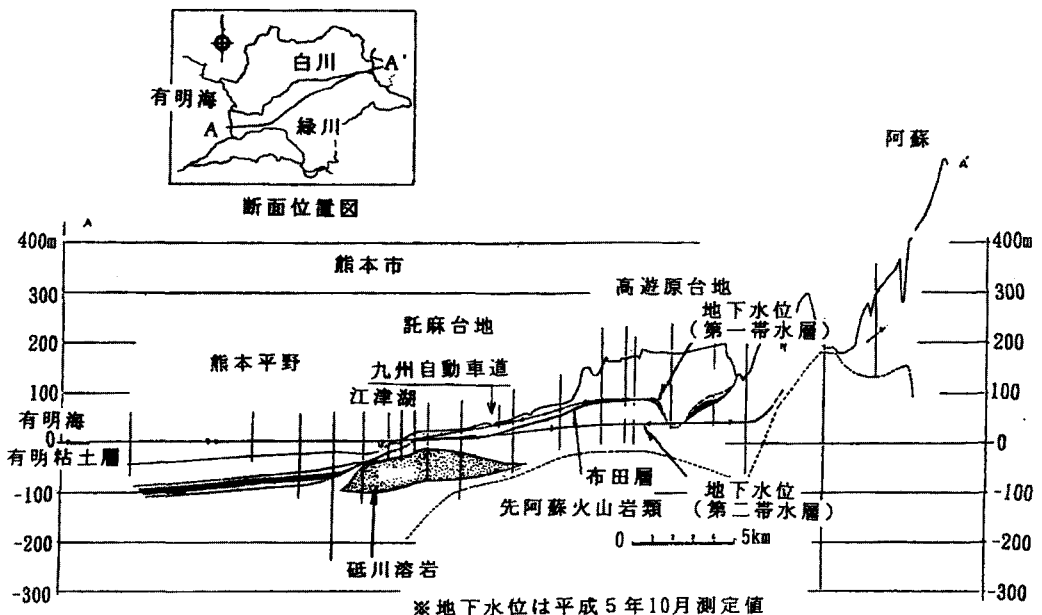


그림 2. 구마모토 지역의 지질단면 및 지하수위 분포도(熊本縣·熊本市, 1995)

표 1. 토지이용 현황(1997년도)

구 분	면 적(km ² , %)			
	산지	농지	도시	계
구마모토현	4,660(63)	1,333(18)	1,407(19)	7,404.0(100)
구마모토 지역	395.6(38)	322.8(31)	322.8(31)	1,041.2(100)

자료 : 熊本縣(2002)

표 2. 구마모토 지역 토지이용의 변화

(단위 : km²)

구 분		1965년	1991년	2010년
		면 적(%)	면 적(%)	면 적(%)
함양지역	논	262.22(25.2)	236.56(22.7)	
	밭	252.56(24.3)	202.28(19.4)	
	초 지	65.51(6.3)	58.42(5.6)	
	임 야	351.78(33.8)	332.42(31.9)	
	수 역	15.82(1.5)	14.62(1.4)	
	소 계	947.89(91.1)	844.30(81.0)	781.47(75.1%)
비함양지역	시가지	26.43(2.5)	75.76(7.3)	
	택 지	60.63(5.8)	99.74(9.6)	
	기 타	6.22(0.6)	21.37(2.1)	
	소 계	93.28(8.9)	196.87(19.0)	259.70(24.9%)
합 계		1,041.17(100.0)	1,041.17(100.0)	1,041.17(100.0)

자료 : 熊本縣·熊本市(1995)

층은 대지(台地)부분은 자유대수층이고 평야부는 상부의 난투수 점토층으로 인하여 피압대수층을 형성하고 있다. 제2대수층은 구마모토 지역의 수도용수의 수원이며 지하수 분포는 평탄한 형상이다. 제2대수층의 동부는 자유대수층이고 구주자동차도로 부근부터 서쪽은 피압대수층이며, 평야부의 지하수위는 지표면 부근이며 제1대수층의 지하수면보다 약간 높다.

구마모토 지역은 백천 연안개발을 위주로 하여 발달하였으며 구마모토시를 포함하는 도시지역도 백천 연안지역에 주로 발달하여 있다. 구마모토 지역을 동서로 가로지르는 백천 유역의 평야부의 논 개발은 16세기 가등청정이 시작하였으며 그 후 100여년간 농업용수 개발과 치수사업을 수행하였다. 본 지역의 토지이용 변화는 도시지역이 증가하고 농지가 감소함으로써 불투수 표면이 증가하게 되어 지하수 함양량이 감소하고 있다. 표 2는 구마모토 지역의 토지이용의 변화를 보여주고 있다. 1965년에는 함양지역이 전체의 91%를 차지하였으나, 1991년에는 81%로 감

소하였으며 2010년에는 75%로 감소할 것으로 추정되었다.

3. 수자원과 지하수 이용량

구마모토 지역의 연평균 강우량은 1,967.7mm이며, 6월과 7월에 많은 양인 약 800mm가 내린다. 과거의 연강우량의 최소치는 1894년의 861.7mm이며, 최대치는 1993년의 3,314mm이다. 수자원량은 연평균 강우량에 지역면적 1,041.2km²을 곱하면 20.5억 m³가 된다.

구마모토 지역의 용수목적별 물이용 현황은 농업용이 608백만m³(76%), 생활용이 137백만m³(17%), 공업용이 38백만m³(5%)이며 합계 795백만m³이다. 농업용은 주로 지표수를 사용하지만 생활용과 양식용수는 전량 지하수에 의존한다. 구마모토 지역의 지하수 의존율은 28%에 달하고 있다.

표 3. 용수목적별 물이용 현황(1997년)

구 분	물 이용량(백만m ³)				
	생 활	공 업	농 업	양식업	계
구마모토현	231(8%)	154(6%)	2,372(85%)	14(1%)	2,771(100%)
구마모토 지역	137(17%)	38(5%)	608(76%)	12(2%)	795(100%)

표 4. 수원별 물이용 현황(1997년)

구 분	물 이용량(백만m ³)										지하수 의존율 (%)
	생 활		공 업		농 업		양식업		계		
	지표수	지하수	지표수	지하수	지표수	지하수	지표수	지하수	지표수	지하수	
구마모토현	40	191	93	61	2,180	192	-	12	2,313	456	16
구마모토 지역	0	137	10	28	559	49	0	12	569	226	28

자료 : 熊本縣(2002)

표 5. 구마모토 지역의 지하수 물수지

(단위 : 백만m³)

구 분	지 역	1990년	1998년
유 입	산지	91.1	88.0
	평야부	610.2	574.0
	leakage	4.2	4.1
	소계	705.5	666.1
유 출	양수	235.4	219.6
	용천수	354.5	341.5
	바다로 유출	128.2	125.4
	소계	718.1	686.5
	물수지	-12.6	-20.4

자료 : Ichikawa(2003)

4. 지하수 수리·수문

구마모토 지역의 지하수 물수지는 표 4와 같다. 함양량과 유출량은 4단 탱크모형을 이용하여 추정하였다. 1990년의 지하수 함양량은 705.5백만m³이다. 이를 구분하면 논에서 320백만m³, 밭에서 290백만m³, 산림에서 91백만m³가 함양된다. 연간 지하수 유출량은 우물양수가 235백만m³, 용천수가 354백만m³, 바다로 흘러가는 양이 128백만m³로 합계 718백만m³이다. 지하수 물수지는 1990년에는 유출이 12.6백만m³ 초과하였고, 1998년에는 20.4백만m³ 초과하였다. 따라서 매년 유출량이 함양량을 초과하기 때문에 과거 30년간 지속적으로 지하수위가 내려가고 있다. 지하수 함양량이 감소하는 주 원인은 백천 중류지역의 논 경작면적의

감소이다. 이 지역의 논 토양은 화산쇄설물로서 투수계수가 매우 커서 함양률이 100~300mm/day에 이른다.

그림 3은 구마모토 지역의 지하수 흐름도이다. 구마모토 지역 중류부에서 지하수 유동속도가 매우 큰 것을 알 수 있다.

구마모토 지역의 장기간 관측한 지하수위를 분석하면 우기 및 영농기인 6월부터 10월까지는 지하수위가 상승하는 반면 건기인 11월부터 다음해 5월까지는 지하수위가 하강하며, 매년 10월에 가장 높은 지하수위를 보여 준다(그림 6).

5. 지하수 이용 및 문제점

구마모토현 지하수 조례와 구마모토시 지하수보전

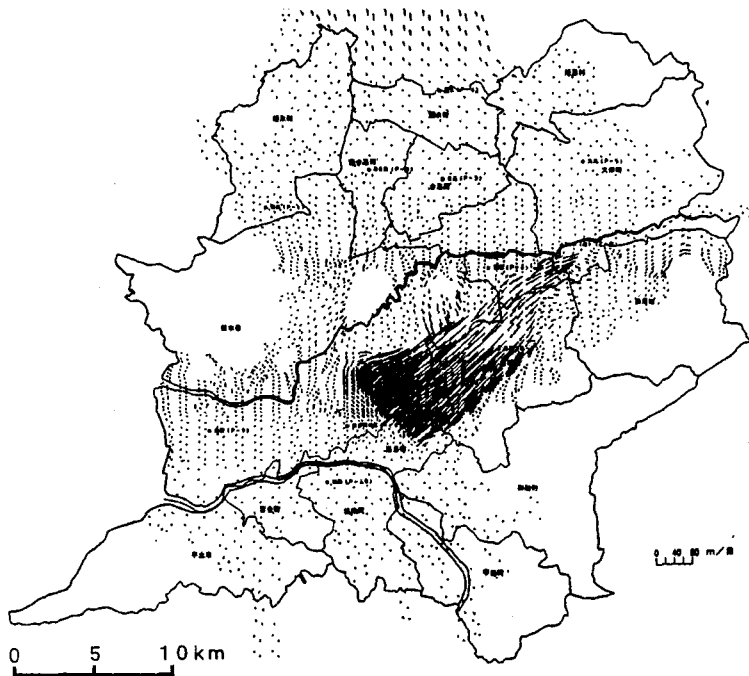


그림 3. 구마모토 지역의 지하수 호름도(熊本縣·熊本市, 1995)

조례에 의하여 1979년부터 지속적으로 지하수를 관측해오고 있다. 지하수 채취량 조사결과에 의하면 구마모토 지역에서는 1995년부터 지하수 채수량이 감소하고 있다.

앞에서 말한 바와 같이 논 경작면적의 감소는 지하수 함양량의 감소를 초래하므로 매우 심각한 문제이다. 그림 4는 연도별 휴경 논 비율의 변화를 보여 주고 있다. 그림 5는 휴경 논 증가에 기인한 白川 중류부의 함양률의 감소양상을 보여준다. 그림 6은 휴경 논 비율에 따른 지하수위 추정치를 보여주고 있다. 그림에서 휴경 논 비율 45%는 현재의 비율이며, 이대로 지속된다면 2010년에는 지금보다 지하수위가 10m 정도 내려가게 된다. 만약 휴경 논 비율을 25%로 유지한다면 지하수위 추정치는 안정된 결과를 보였다.

6. 지하수 보전관리대책

(1) 절수 및 합리적 이용

앞으로 인구의 증가와 산업의 발달로 지하수 채취량

의 증가는 피할 수 없다. 구마모토 지역의 2010년도의 지하수 채취량 추정치는 279,847천 m^3 로 1990년에 비해 19% 증가할 것으로 추정되었다(熊本縣·熊本市, 1995). 구마모토 지역의 1인 1일 생활용수 사용량은 전국평균 326ℓ 보다 많은 357ℓ 에 달한다. 따라서 절수를 통하여 생활용수 수요량을 줄여야 할 것이다. 공업용수는 재이용을 통하여 합리적 이용이 가능하다. 구마모토 지역의 공업용수 재이용률은 전국평균치인 76%에 못 미친다. 이러한 절수와 이용합리화를 통하여 지하수 수요량을 감소시키면 2010년도의 지하수 채취량 추정치는 279,847천 m^3 에서 12% 절감시킨 251,383천 m^3 로 충분할 것으로 추정되었다.

(2) 지하수위 저하 방지

구마모토 지역의 지하수위는 과거 30년간 꾸준히 저하하고 있다. 현 상태로 지하수 채취량이 증가한다면 2010년에 白川 중류부 제2대수층의 수위는 1990년에 비해 2m의 수위저하가 예상된다. 절수 및 합리화를 도입하면 수위저하는 수십 cm 정도에 머물 수 있을 것이다.

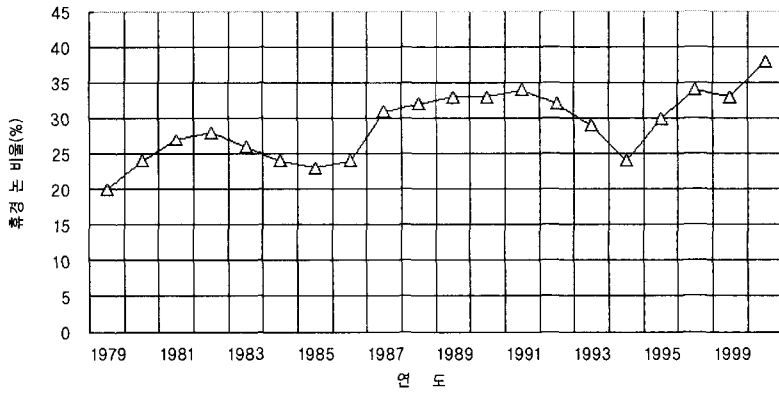


그림 4. 연도별 후경농 비율의 변화

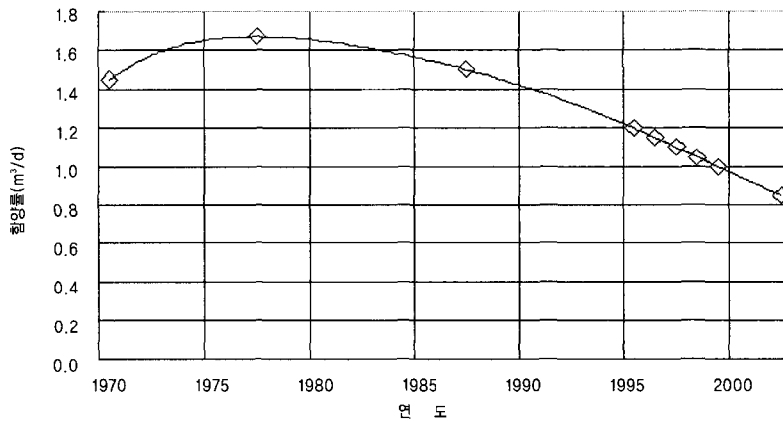


그림 5. 白川 중류부의 후경농의 변화(Ichikawa, 2003)

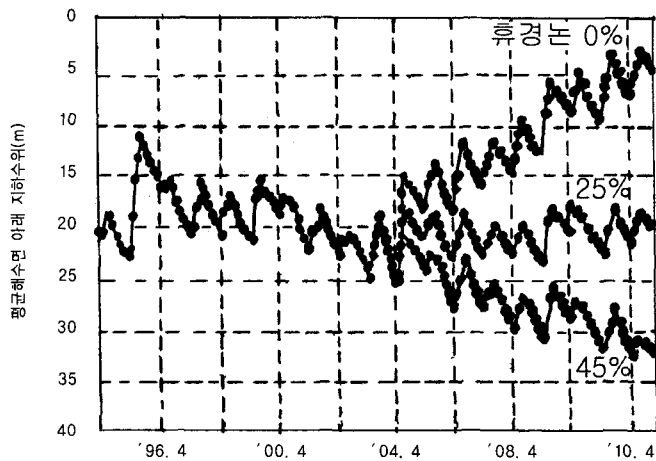


그림 6. 후경농 비율에 따른 지하수위 추정치(Ichikawa, 2003)

(3) 지하수 장애의 방지

모델 시뮬레이션 결과 바다로 유출하는 지하수량은 1990년에 5.4백만m³에서 2010년에는 3.5백만m³로 감소할 것으로 추정되었다. 이로 인하여 염수의 침입이 걱정된다.

또한 지하수위를 감안하면 제1대수층에서 제2대수층으로 누수량이 1990년에 4.2백만m³에서 2010년에는 8.6백만m³로 증가할 것으로 추정되었다. 이는 구마모토 평야의 연약 점토층 상부의 제1대수층 지하수를 감소시켜 지반침하가 우려된다. 따라서 이 지역에서의 절수 및 합리적 물 이용대책이 요구된다.

(4) 지하수 함양능력 보전방책

구마모토 지역의 특성과 실현가능성을 고려하여 지하수 함양능력 보전방책은 다음 세 가지로 볼 수 있다.

(가) 지하수 함양량은 침수성 지역의 함양면적에 지배되므로 개발로 인하여 불투수 지역으로 변화

될 때에는 우수침투 시설을 설치하여 함양능력을 확보하는 조치가 필요하다.

(나) 함양지역 내에서 함양량이 매우 큰 논을 활용한 다. 구체적으로는 휴경 논에서 함양을 하며 함양 시기는 주변 논에 방해가 없는 겨울철에 한다. 모델 시뮬레이션 결과 감수심이 100mm/day인 白川 중류부의 휴경 논 면적의 15%인 76ha에 관개하였을 때 지하수위가 0.4m 상승하는 것으로 추정되었다.

(다) 논과 밭이 유력한 함양지역이지만 비닐하우스가 설치되면 불투수지역으로 변한다. 이 때에는 비닐하우스에 우수가 침투할 수 있는 조치를 취한다. 모델 시뮬레이션 결과 비닐하우스 지역의 50%에 우수침투시설을 설치하였을 때 지하수위가 제1대수층은 1.6m, 제2대수층은 1.4m 상승하는 것으로 추정되었다.

표 6. 구마모토 지역의 건전한 물 순환계의 구축 방안

가. 구마모토 지역 물 순환계의 문제점	
<ul style="list-style-type: none"> • 수원 함양지역의 감소 • 물 수요량의 증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수 함양지역의 감소 • 지하수위 저하와 용천수량 감소 • 수질의 악화
나. 건전한 물 순환계의 구축 방안	
<p>1) 수원 함양지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 산림의 적절한 관리 • 중산간 지역 농지의 적절한 보전 • 생활배수의 적절한 처리 • 폐기물 불법 투기의 사전예방 • 유해물질로부터 지하수의 오염방지 	<p>2) 지하수 함양지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 산림과 농지의 적절한 관리 • 농업용수원을 지하수에서 지표수로 전환 • 택지 등을 개발하더라도 함양기능 유지확보 • 생활배수의 적절한 처리 • 과잉시비, 가축분뇨 등으로 부터의 수질오염방지 • 유해물질로부터 지하수의 오염방지
<p>3) 도시지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 수도용수, 공업용수, 농업용수 사용의 절수 및 합리화 • 광역적인 물 공급 • 다양한 수원확보 방안 검토 • 우수의 지하침투 촉진 • 지하수 채취규제 검토 • 자연환경을 배려한 하천정비 	<p>4) 도시지역과 함양지역의 연휴</p> <ul style="list-style-type: none"> • 도시지역의 지원으로 수원기능의 유지증진 <ul style="list-style-type: none"> - 지하수 보전사업 지원시스템 구축 - 논·밭의 보전과 활용 지원 - 산림정비를 촉진하는 함양지역의 지원방안 검토 • 우리 모두의 하천과 바다 만들기의 촉진 • 물환경의 보전과 물 살리기 지역 만들기와 상하류간의 교류촉진 • 조사연구결과와 정보의 개방

자료 : 熊本縣(2002)

구마모토 지역의 지속가능하고 건전한 물 순환계의 구축 방안은 표 6과 같다.

환체계 구축방안을 소개하였으며, 앞으로 우리나라의 유사한 지역에서 참고가 될 것으로 생각한다.

7. 요약 및 결론

일본 큐슈 구마모토 지역의 지하수 이용실태와 관리방안에 대하여 소개하였다. 이 지역은 일본에서 생활용수를 100% 지하수에 의존하고 있는 가장 넓은 지역이다. 논 경작면적의 감소는 지하수 함양량을 감소시키게 되어 지하수위를 저하시키게 된다. 구마모토 지역의 여러 가지 지하수 보전대책과 건전한 물 순

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행되었으며, 일본 구주동해대학 도시공학과 Tsutomu Ichikawa 교수의 방문 허락과 자료제공에 대해 감사드린다.

참고/문/헌

熊本縣・熊本市(1995), 平成6年度 熊本地域 地下水 総合調査報告書, 122pp.
 熊本縣(2002), 熊本縣 水資源 總合計劃, 93pp.
 熊本市(2003), 熊本の 地下水, 17pp.
 熊本地下水研究會(2000), 熊本地域의 地下水 研究・對策史, 166pp.
 熊本地下水研究會(2001), 地域の 歴史的遺産を 活用した 地下水保全システムの 研究, 217pp.
 熊本地下水研究會(2002), 白川 中流域 水田地帯 保全方策의 研究, 272pp.
 桐山貴文, 市川勉(2004), 水田を 涵養域に 持つ 地域の 地下水保全について, 水工學論文集 48, pp.1-6
 桐山貴文, 市川勉, 星田義治(2000), タンクモデルによる

熊本地域における 地下水位의 推定, 水工學論文集 44, pp.223-228
 桐山貴文, 市川勉, 星田義治(2002), 熊本地域における 地下水位, 湧水量의 推定と 地下水保全 について, 第6回 水資源に 關する シンポジウム論文集, pp.99-104
 荒牧昭二郎, 金子好雄, 市川勉, 岡本智伸, 椛田聖孝(2003), 熊本市 上江津湖의 地下水環境に 關する 研究, 應用地質 44(2), pp.104-111
 Ichikawa, T.(2003), Water circulation and use in the Kumamoto groundwater basin. Proceedings of the 3rd World Water Forum. Agriculture, Food and Water S1-5-1