

국제 가상수 교역량 산정 및 교역 구조의 변화 분석



이 상 현
서울대학교 농업생명과학연구원 / 선임연구원
yalgary0@snu.ac.kr

1. 서론

가상수(Allan, 1993)는 단위생산량 당 소비되는 물의 양을 의미하며 최근에는 용수공급부터 소비되는 부분까지의 이력을 포함하는 물발자국이라는 개념으로 확장되었다. 이에 따라 물발자국은 자연강우에 의해 토양에 내 재되는 물을 소비하는 개념인 녹색 물발자국과 관개시설에 의해 하천수 또는 지하수를 인위적으로 취수하여 사용하는 청색 물발자국으로 구분된다. 또한 제품 생산 시 발생하는 오염물질을 정화하기 위해 사용되는 회색 물발자국이 포함되었다(Hoekstra et al., 2011). 이와 같은 가상수의 개념을 적용한 농작물 교역 연구에서는 국가간 농작물이 교역될 때 생산을 위해 소비된 가상수가 동시에 수출되는 것으로 간주하였고, 국가간 농축산물 교역을 통한 가상수 수입이 식량 및 물 부족국가의 위기를 해결하기 위한 방안임을 제시하였다(Chapagain and Hoekstra, 2003; Zeitoun et al., 2010; Mao et

al., 2012). 또한 다양한 연구에서 농작물의 소비와 생산이 구분(Davis and Calderia, 2010)되고 수자원 부족량이 불균형적으로 분포(World Bank, 2010)됨에 따라 수자원의 균형적인 활용을 위한 가상수 흐름의 중요성을 제시하고 있다(Duarte et al., 2002; Guan and Hubacek, 2007; Hubacek et al., 2009). 가상수 교역 구조에 관한 최근 연구결과를 살펴보면 미국의 프린스턴 대학의 연구진은 1986년부터 2007년까지 전세계 가상수 무역을 비교하는 연구를 수행하여 그 결과를 미국 국립과학원회보 저널에 발표하였는데, 2007년 전세계 가상수 무역은 5억 6700만 리터에 이르렀고, 이는 1986년 전세계 가상수 무역량의 2배임을 강조하였다(Dalin et al., 2012). 또한 기후변화에 따라 가상수 교역 흐름의 변화와 물질약에 대한 연구 역시 수행되어 왔다(Konar et. al., 2013).

이와 같은 가상수 교역의 개념은 수자원과 식량안보를 동시에 고려한 교역 정책을 수립할 때 수출 작물 생

산을 위해 사용된 수자원과 작물 수입량의 관계를 보여 주는 지표로서 중요한 의미가 될 수 있다. 즉, 한 국가내에서 수출 작물을 생산하기 위하여 소비된 수자원은 수입국이 가상적으로 사용한 것으로 고려하여 수출국의 수자원 사용량과 수입국의 가상적인 소비량(수입량)의 관계를 가상수 교역 네트워크로 표현할 수 있다. 가상수의 교역을 네트워크 구조로 이해할 경우 수출 작물 생산을 위하여 사용된 수자원이 어떤 국가들을 위해 소비된 것인지를 파악하기 용이하고, 네트워크 분석을 수행하여 가상수 교역의 집중도 및 중심지역 등의 파악이 가능해질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 우리나라 및 전세계 가상수 교역량을 산정하고 네트워크 중심성 분석을 통하여 가상수 교역 구조의 특징을 분석하고자 하였다. 특히, 국가별 가뭄과 연계하여 시기별 가상수 교역 구조 변화를 이해하고자 하였다.

2. 국가간 가상수 교역

농작물의 교역은 가상수 흐름을 내포하기 때문에 수출국의 물발자국과 교역량을 활용하여 가상수 흐름량을

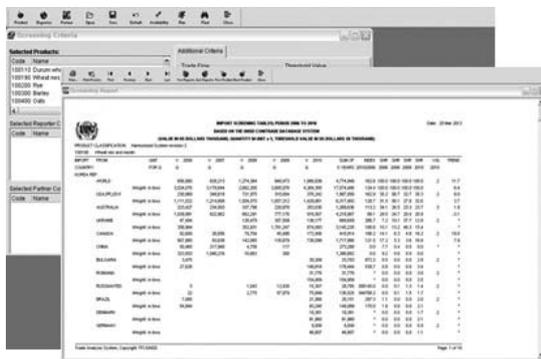


Fig. 1 PC-TAS

산정할 수 있다. 본 연구에서 활용한 국가간 농작물 교역 데이터는 ITC (International Trade Centre)에서 개발된 무역 데이터 분석 시스템인 PC-TAS (Personal Computer-Trade Analysis System)를 활용하였다. PC-TAS는 5년 동안의 230개 국가의 HS 코드 기준의 5300개 생산품에 대한 수출입 데이터를 활용한다(ITC, 2011). 다음으로 국외 물발자국 자료는 Mekonnen and Hoekstra (2010)의 국가별 녹색 및 청색 물발자국 산정 결과를 활용하였다.

○ 국가별 물발자국 자료 조사

: Value of Water Research Report Series No. 47 활용 (Mekonnen and Hoekstra, 2010)

○ 국가간 농작물 교역 자료 조사

: PC-TAS (Personal Computer-Trade Analysis System)

: HS-code 기준 5300개 생산품의 230개 국가간 최근 5개년 동안의 작물 교역 데이터 제공

○ 가상수 교역량 산정 : 수출국 중심의 가상수 교역량 산정

$$VWF[n_e, n_i, p] = T[n_e, n_i, p] \times vwc[n_e, p]$$

VWF : virtual water flow

n : country, e : export

i : import, p : product

3. 우리나라의 농작물 가상수 교역 현황

식량작물로서 밀, 논벼(쌀), 보리, 기타 작물을 대상으로 작물 수입량과 이에 따른 가상수 수입량을 산정하여 비교하였다. 식량작물로서 주로 수입되는 밀의 경우

2006년부터 2010년동안 약 16 Mton이 수입된 것으로 조사되었고, 각 주요 수입국들의 밀의 물발자국을 적용하여 가상수 수입량을 분석한 결과 약 27 Gm³의 녹색 가상수와 1.4 Gm³의 청색 가상수가 우리나라로 수입된 것으로 나타났다. 이는 사료용 작물인 옥수수와 대두박을 제외하고 가장 큰 수입량으로서 주로 미국에서 수입되는 것으로 나타났다.

논벼의 경우 논벼와 현미, 백미, 쌀가루를 포함한 수출입량으로서 중국으로부터 주로 수입하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 밀과 비교하여 상당히 적은 양을 수입하고 있으며 이에 따라 우리나라의 쌀 자급률이 높은 것으로 사료된다. 그러나 논벼의 경우 청색 물발자국이 높은 작물로서 약 1.5 Mton의 수입으로부터 녹색 가상수 약 1.4 Gm³, 청색 가상수 약 0.9 Gm³의 가상수가 수입되는 것으로 나타났다.

우리나라 농작물 교역의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 옥수수와 대두, 대두박 등의 두류작물의 수출입량과 가상수 흐름량을 산정하였다. 사료용 목적으로 주로 수입되고 있는 옥수수의 경우 5년동안 총 45 Mton이 수입되었는데 밀의 약 2.8배에 해당한다. 이중 약 70% 이

상이 미국에서 수입되고 있다. 미국의 약 18.3 Gm³의 녹색 가상수와 2.2 Gm³의 청색 가상수가 우리나라로 수입되었고, 중국으로부터 약 5 Mton을 수입하고 있으며 이에 따라 약 4.5 Gm³의 가상수가 동시에 수입되는 것으로 산정되었다. 대두 및 대두박 등의 두류작물의 경우 옥수수의 약 1/3 수준인 15 Mton이 수입되는 것으로 나타났다지만 가상수 수입량을 분석할 경우 옥수수보다 많은 약 3.2 Gm³의 가상수가 수입되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 작물마다 각 국가들의 물발자국이 다르기 나타나는데 두류작물의 물발자국이 대체적으로 옥수수의 물발자국보다 크기 때문이다. 녹색과 청색 가상수를 구분하여 가상수 수입량을 비교할 경우 두류작물의 녹색 가상수 수입량은 31.7 Gm³이고 청색 가상수의 수입량은 0.7 Gm³으로 나타났고, 타 작물과 비교하여 두류작물 생산은 대부분 녹색 가상수에 의존하는 것으로 나타났다. 우리나라는 브라질로부터 두류작물의 수입에 따라 약 12.4 Gm³의 녹색 가상수와 4.7 Mm³의 청색 가상수가 수입되는 것으로 나타났다. 이와 같은 사료용 작물 수입은 주로 미국과 브라질, 중국의 3개 국가에 집중되는 현상을 보이고 있다.

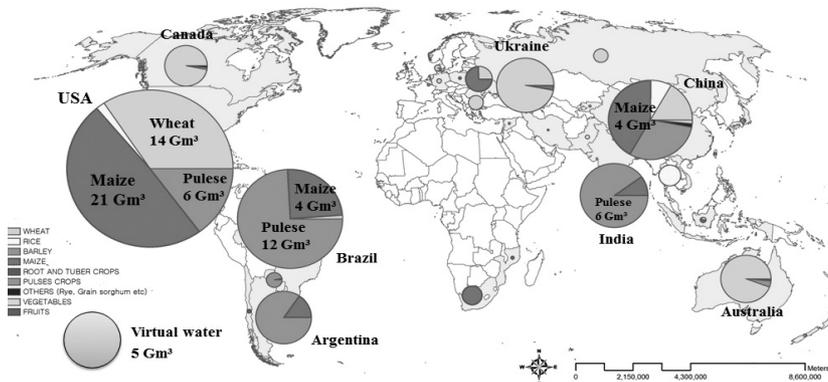


Fig. 2 Import of virtual water in Korea from 2006 to 2010

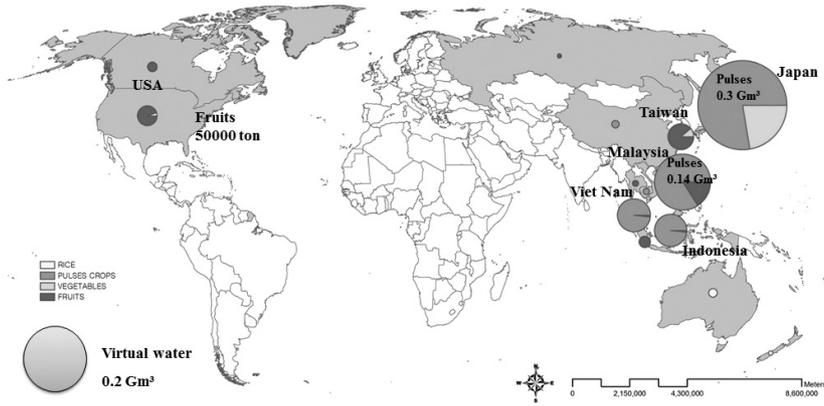


Fig. 3 Export of virtual water in Korea from 2006 to 2010

Table 1. Trade of crops and virtual water in Korea from 2006 to 2010 ($Mm^3 : 10^6 m^3$)

Crops		Import (1000 ton / Mm^3)				Export (1000 ton / Mm^3)			
		Crop	Green water	Blue water	Total water	Crop	Green water	Blue water	Total water
Cereals	Wheat	16027	27004	1433	28436	0	0	0	0
	Rice	1497	1444	892	2336	6	2	4	6
	Barley	166	203	10	213	0	0	0	0
	Others	168	255	8	263	0	0	0	0
Root and tuber crops		89	8	7	16	0	0	0	0
Maize		45136	29565	2710	32275	0	0	0	0
Pulse crops		15716	31729	675	32403	213	596	0	596
Vegetables		982	187	8	195	162	100	2	102
Fruits		181	37	14	51	178	107	0	107
Total		79962	90430	5756	96186	559	805	6	811

우리나라에서의 농작물 수출의 경우 수입량과 비교하여 양은 상당히 작지만 우리나라의 수자원이 사용된 작물이라는 점에서 중요한 의미를 갖게 된다. 우리나라는 주로 일본과 대만에 두류와 채소류, 과수류를 수출하는 것으로 나타났다. 이에 따라 일본과의 농작물 교역에 따라 약 0.3 Gm^3 의 가상수가 수출되는 것으로 나타났고,

말레이시아와의 두류작물 교역으로 0.14 Gm^3 의 가상수가 수출되는 것으로 나타났다.

4. 전세계 농작물 가상수 교역 현황

전세계 가상수 흐름량 산정 결과로부터 농작물 수출

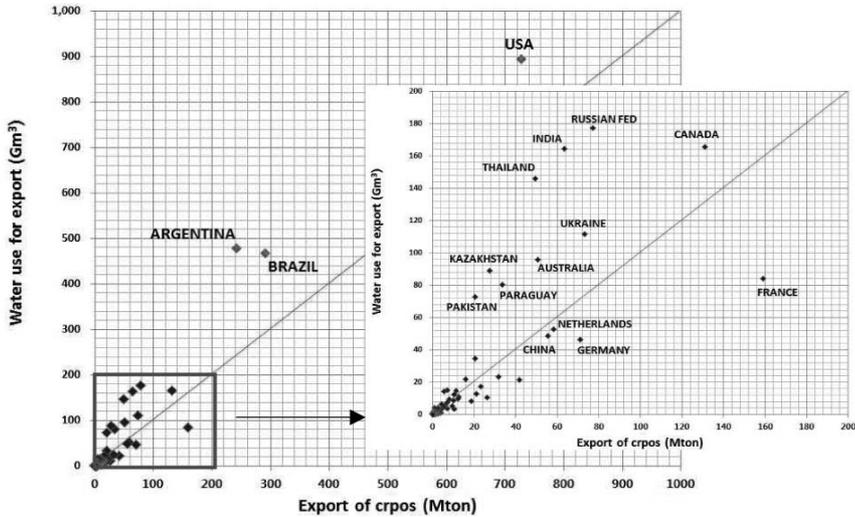


Fig. 4 Comparison between crop export and water use for export

량과 가상수 수출량을 국가별로 비교하여 수출량 당 물발자국의 상대적인 크기를 비교하였다. 미국, 아르헨티나, 브라질 등은 타 국가들과 비교하여 대상작물의 수출량이 많고, 물발자국의 크기가 큰 작물의 수출이 주를 이루는 것으로 나타났다. 다음으로 중·소규모의 대상작물 수출국 중에서 캐나다, 러시아, 인도, 태국 등은 상대적으로 물발자국의 크기가 큰 작물을 수출하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 프랑스, 독일의 경우 타 국가와 비교하여 물발자국이 비교적 작은 농작물을 수출하는 것으로 나타났다.

대상작물들의 교역에 의한 전세계 가상수 흐름량을 살펴보면 밀의 경우 2006년부터 2010년까지 총 674.9 Mton이 거래되었으며 이에 따라 1,023.8 Gm³의 녹색가상수와 34.0 Gm³의 청색가상수의 흐름이 발생한 것으로 산정되었다. 주로 미국과 캐나다에서 대량의 밀이 수출되었고, 이집트와 이탈리아, 브라질에서 대량의 밀

Table 2. Trade of crops and virtual water in World (M:10⁶, G:10⁹)

Crops		Amount of trade (Mton / Gm ³)			
		Quantity	Green water	Blue water	Total water
Cereals	Wheat	674.9	1023.8	34.0	1057.8
	Rice	148.8	246.9	136.7	383.5
	Barley	124.9	136.1	5.3	141.3
	Others	37.0	46.3	2.1	48.4
Root and tuber crops		44.8	4.5	1.8	6.2
Maize		531.2	423.0	28.5	451.5
Pulse crops		712.6	1329.6	30.8	1360.4
Vegetables		156.7	21.1	6.9	28.0
Fruits		105.3	43.2	14.7	58.0
Total		2536.1	3274.5	260.8	3535.2

을 수입하는 것으로 나타났다. 이에 따라 미국에서는 5년 동안 약 298.2 Gm³의 가상수가 수출되었고, 이집트

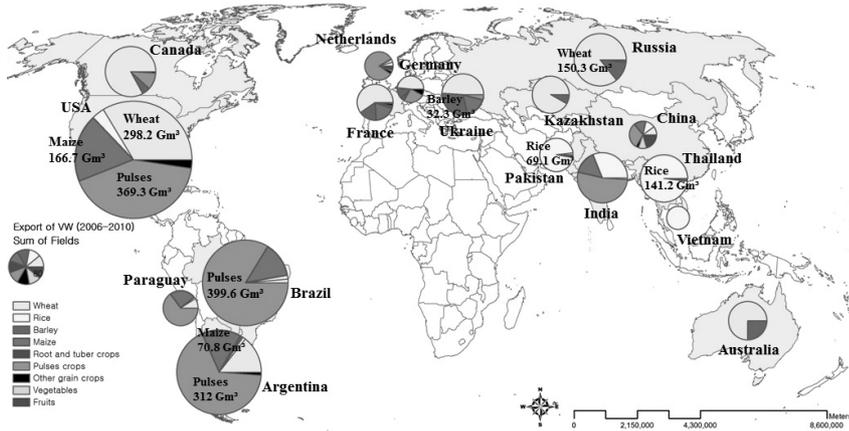


Fig. 5 Exports of virtual water in the World from 2006 to 2010

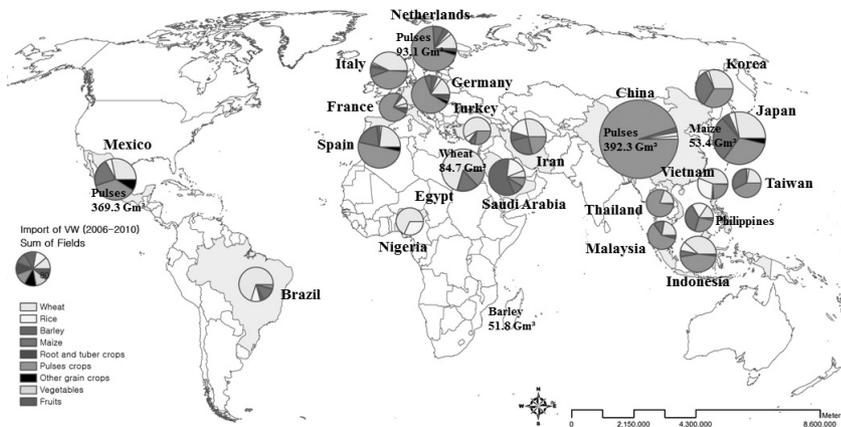


Fig. 6 Imports of virtual water in the World from 2006 to 2010

는 약 84.7 Gm³ 가상수가 수입된 것으로 나타났다.

논벼(쌀)의 경우 태국에서 주로 수출되고 있으며 약 141.2 Gm³의 가상수가 국외로 수출되는 것으로 나타났다. 태국에서 수출된 가상수는 다양한 국가로 수입되는 것을 볼 수 있는데 필리핀에서 약 18.7 Gm³, 코트디부아르에서 약 16.8 Gm³, 사우디아라비아에서 약 15.1 Gm³의 가상수를 수입하고 있으며 주로 중동 및 아프리카 국

가로 수입되는 것을 확인할 수 있다. 특히 논벼(쌀)의 경우 관개시설에 의해 인위적으로 공급되는 수량인 청색 가상수의 흐름이 타 작물에 비하여 상당히 많은 것으로 나타났다. 전세계적으로 5년 동안 약 136.7 Gm³의 청색 가상수가 이동되는 것으로 나타났으며 이에 따라 관개 시설에 의한 용수 공급이 가상수 흐름 구조를 변화시킬 수 있는 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

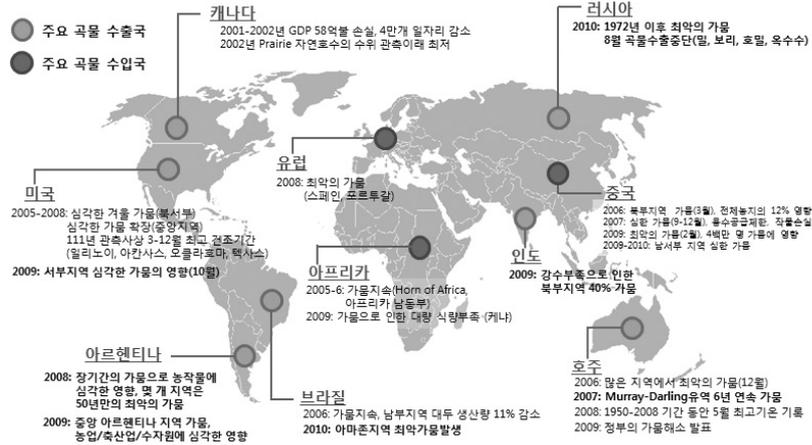


Fig. 7 Statement on the status of the global climate in 2001–2010 (WMO, 2010)

식량작물로 주로 활용되는 곡물의 가상수 흐름은 주로 미국 및 태국, 인도, 프랑스 등의 국가에서 수출되어 중동 국가 및 북유럽 국가로 수입되는 것으로 분석되었고, 결론적으로 가상수 흐름은 수자원이 부족한 중동국가에서 타 국가의 수자원을 가상적으로 수입하여 작물 생산에 의해 발생할 수 있는 물부족 문제를 해결하는 것으로 판단할 수 있다.

사료용으로 주로 수출입 되는 옥수수 및 두류작물을 살펴보면 옥수수의 경우 전세계 수출량의 약 50% 정도를 미국에서 수출하는 것으로 나타났다. 이에 따라 미국의 가상수 수출량은 약 166.7 Gm³으로서 밀과 함께 가장 많은 가상수를 수출하고 있는 것으로 나타났다. 그 외에 아르헨티나, 브라질 등 남아메리카 국가에서 주로 옥수수 교역에 의해 자국의 가상수를 타 국가로 수출하는 것으로 나타났다. 이와 같은 사료용 작물에 의한 가상수는 주로 일본과 한국으로 수입되고 있다. 특히 우리나라의 경우 옥수수 수입이 세계에서 두 번째로 많은 국가로서 전세계 옥수수 교역에 의한 가상수 수입량의 약 7%에 해당하는 32.3 Gm³의 가상수가 수입되는 것으로

나타났다. 대두 및 대두박 등의 두류작물의 경우 옥수수와 유사하게 미국과 아르헨티나, 브라질에서 주로 수출되며, 전세계 두류작물의 총 가상수 수입량의 약 29%인 392.3 Gm³의 가상수가 중국으로 수입되는 것으로 나타났다. 특히 두류작물은 전세계 작물 수입량이 712.6 Mton 이지만 물발자국이 크기 때문에 가상수 수입량은 1,360.4 Gm³로 타 작물들 보다 상당히 많은 양이 수출입 되는 것으로 나타났다.

5. 국가별 가뭄 발생에 따른 가상수 교역 변화

주요 국가들의 가뭄은 해당국가의 수자원량의 변화 외에 가상수 교역 관계 국가들의 교역량 및 전세계 가상수 교역 구조의 변화를 발생시킬 수 있다. 그러므로 안정적인 교역을 위해서는 주요 국가들의 가뭄 현상과 가상수 교역 구조의 변화의 연관성을 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 WMO (World Meteorological Organization)의 2000년 이후의 국가별 가뭄 기록과 해당년도의 가상수 교역의 중심성 지수 변화를 비교하

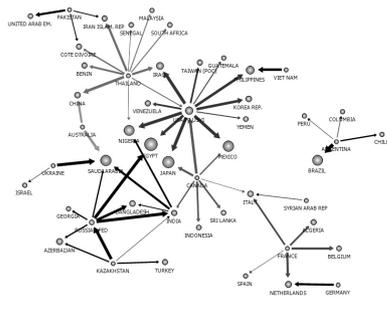


Fig. 8 Degree centrality of VWF in 2006 (Grain crops)

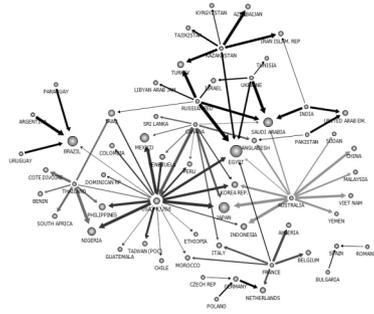


Fig. 9 Degree centrality of VWF in 2010 (Grain crops)

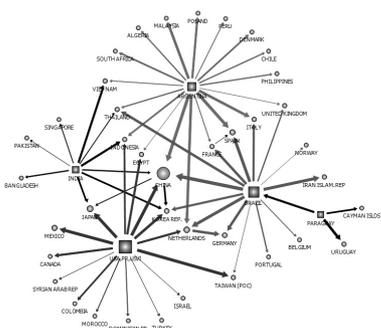


Fig. 10 Degree centrality of VWF in 2006 (Maize & Pulse crops)

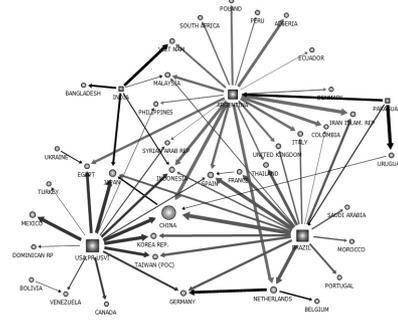


Fig. 11 Degree centrality of VWF in 2010 (Maize & Pulse crops)

여 전세계 가상수 교역 구조의 변화를 분석하였다.

식량작물을 대상으로 분석한 결과 2006년에는 미국, 러시아, 태국, 캐나다, 프랑스가 가상수 흐름의 연결중심지로 나타났다. 미국의 경우 나이지리아, 이집트 및 멕시코, 일본 등과 주 연결 관계를 형성하는 것으로 나타났고, 러시아의 경우 중동 및 중앙 아시아 국가와 주 연결 관계를 형성하였다. 이와 같은 중심지는 시기가 지나면서 변화하게 되는데 2007년에는 각 중심지들의 세력권이 보다 확장되는 형태로 나타났다. 특히 러시아와 카자흐스탄의 중심성이 보다 높아지는 것을 확인할 수 있다. 2009년 미국 서부지역에서 심각한 가뭄이 발생함에 따라 밀을 포함한 식량작물의 가상수 교역에 대한 미국의 연결중심성이 상당히 낮아지게 되었다. 또한 강수

부족으로 인하여 인도 북부 지역의 40%가 가뭄을 겪게 되고, 이에 따라 인도 및 카자흐스탄의 연결중심성이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 2008년부터 2009년에 이르면서 호주의 가뭄이 해소됨에 따라 가상수 수출의 새로운 중심지로서 부상되는 것으로 나타났다. 미국과 주 연결국가인 일본, 한국, 인도네시아가 미국의 가상수 수출 약세로 인하여 호주와의 가상수 교역 연결을 구축하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 미국의 가상수 흐름 중심성의 약화에 따라 가상수 수입 중심국들은 새로운 수출 중심지와의 가상수 교역 관계를 확장하는 것을 흐름 네트워크의 변화를 통하여 확인할 수 있다. 2010년 러시아는 1972년 이래 최악의 가뭄을 겪게 되고, 그해 8월 밀, 보리 등의 곡물 수출을 중단하게 된

다. 이에 따라 러시아의 가상수 수출의 중심성이 상당히 낮아지게 된다. 이와 같은 러시아의 약세에 따라 아시아 권에서는 카자흐스탄과 인도의 가상수 수출 중심성이 높아지게 된다. 전체적으로 2010년의 식량작물의 가상수 교역은 2006년과 비교하여 다변화된 것을 알 수 있으며, 주요 국가들의 가뭄에 따라 전세계의 가상수 교역 구조가 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

옥수수과 대두 등 사료용으로 주로 수출입되는 작물의 경우 식량작물과는 차별되는 국가별 가뭄과 가상수 교역 구조 관계를 보여준다. 미국과 브라질, 아르헨티나가 가상수 수출을 주도하고 있고, 대부분이 중국으로 수입되는 가상수 흐름 구조를 나타낸다. 이에 따라 미국, 브라질, 아르헨티나의 가상수 수출 중심성의 변화는 전세계 흐름 구조에 영향을 미치게 된다. 2008년부터 2010년까지 미국, 아르헨티나, 브라질 3개 국가가 가상수 수출의 중심 역할을 수행하는 것으로 나타났고, 이차적인 중심지로는 인도와 파라과이로 나타났다. 가상수 구조의 특징 중 하나는 유럽시장의 사료용 작물 가상수 흐름은 주로 브라질과 아르헨티나에 의해 이루어지고 있고, 한국, 일본의 동아시아 국가는 미국에 의존적인 가상수 흐름을 나타냈다. 중국의 경우 미국, 아르헨티나, 브라질, 인도 등 주 수출국 대부분과 연결관계를 유지하는 것으로 나타났다. 요약하면 2006년에는 미국, 아르헨티나, 브라질이 각자의 고유 흐름 권역을 유지하고 있었지만 2010년이 될수록 브라질의 가상수 흐름이 확대되어 아르헨티나와는 유럽권역과의 연결을 주도하고, 미국과는 한국, 중국, 대만 등 아시아 국가와의 연결을 주도하는 교역관계로 변화하였다.

6. 결론

본 연구에서는 물 스트레스 해소를 위한 중요한 해결 방안 중 하나로 조명되고 있는 가상수의 교역에 대해 분석하고자 우리나라와 전세계 농작물의 가상수 교역량을 산정하였다. 산정된 결과를 네트워크 중심성 분석에 적용하여 복잡합 가상수 흐름 구조의 중심국가 및 주 가상수 흐름을 도출하고자 하였다. 또한 국가별 가뭄과 시기별 가상수 교역 구조의 변화를 연계하여 설명하였다. 국가간의 농작물 교역을 가상수의 흐름으로 설정하여 교역 구조의 변화를 분석하였다는 점에서 연구의 의의가 있으며 향후 가상수 변화를 고려한 농작물 교역 정책 수립시 중요하게 고려해야 하는 국가 선정 및 연결 국가들과의 관계를 분석할 때 중요한 기초자료로써 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Allan, J.A., 1993, Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible In: Priorities for water resources allocation and management, ODA, London, 13-26 pp.
2. Chapagain, A.K. and A.Y. Hoekstra, 2003, Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products, Value of Water Research Report Series No. 13, UNESCO-IHE.
3. Davis, S.J., and K. Caldeira, 2010, Consumption-based accounting of CO2 emissions, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., Vol. 107, 5687-5692 pp.
4. Duarte, R., J. Sanchez-Choliz, and J., Bielsa, 2002, Water use in the Spanish economy: an input-output approach, Rcol. Econ., Vol. 43, 71-85 pp.

5. Guan, D., and K. Hubacek, 2007, Assessment of regional trade and virtual water flows in China. *Ecol. Econ.*, Vol. 61, 159–170 pp.
6. Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, and M.M. Aldaya, 2011, *The water footprint assesemnt manual*, Earthscan, London, UK.
7. Hubacek, K., D. Guan, J. Barrett, and T. Wiedmann, 2009, Environmental implications of urvanization and lifestyle change in China: ecological and water footprints, *Journal of Cleaner Production.*, Vol. 17, 1241–1248.
8. International Trade Centre (ITC) UNCTAD/GATT, 2011, PC-TAS (The Personal Computer Trade Analysis System).
9. Mao, X., and Z. Yang, 2012, Ecological network analysis for virtual water trade system: A case study for the Baiyangdian Basin in Northern China, *Ecological Informatics*, Vol. 10, 17–24 pp.
10. Mekonnen, M.M. and A.Y. Hoekstra, 2010, The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Value of Water Research Report Series No. 47*, UNESCO-IHE.
11. Zeitoun, M., J.A. Allan, and Y. Mohieldeen, 2010, Virtual water 'flows' of the Nile Basin, 1998–2004: a first approximation and implications for water security. *Global Environ. Change*. Vol. 2(20), 229–242 pp.
12. World Bank, 2010, *World Development Indicator*, The World Bank Group.
13. Konar, M., Z. Hussein, N. Hanaski, D. L. Mauzerall, and I. Rodriguez-Iturbe, 2013, Virtual water trade flows and savings under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 17, 3219–3234 pp.
14. Dalin, C., M. Konar, N. Hanaski, A. Rinaldo, and I. Rodriguez-Iturbe, 2012, Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of National Academy of Science*. Vol. 109(16), 5989–5994 pp.

기획: 배승중