

남한 풍력자원 잠재량의 예비적 산정

김현구*

*한국에너지기술연구원 풍력발전연구단(hyungoo@kier.re.kr)

Preliminary Estimation of Wind Resource Potential in South Korea

Kim, Hyun-Goo*

*Korea Institute of Energy Research(hyungoo@kier.re.kr)

Abstract

The wind resource potentials of South Korea are estimated as preliminary stage using the national wind map which has been being established by numerical wind simulation and GIS (Geographical Information System) exclusion analysis. The wind resource potentials are classifying into theoretical, geographical, technical and implementation potentials and the calculation results are verified by comparing to other countries' potentials. In GIS exclusion, urban, road, water body, national parks and steep slope area are excluded from onshore geographical potential while water depth and offshore distance from the shoreline are applied as offshore exclusion conditions. To estimate implementation potential, dissemination records of European countries are adopted which is about 1/8 of geographical potential. The implementation potential of South Korea would correspond 12.5GW which is 1.7 times of the national wind energy dissemination target until 2030.

Keywords : 풍력자원 잠재량 (Wind resource potential), 국가바람지도 (national wind map)

1. 서 론

풍력을 포함한 재생에너지 기술개발보급(renewable R&DD)은 정부의 지원정책에 의해 선도되기 마련이며, 이때 우선적으로 명확한 보급목표가 제시되는 것이 중요하다. 이를 위해서는 풍력자원 잠재량을 산정하여 기술적으로 개발 가능한 보급목표를 파악한

후 주어진 시간적, 산업적, 정책적 제약조건 하에서 실질적으로 보급가능한 정량목표를 도출하여야 할 것이다.

정부에서는 2011년까지 국내 전력수요의 5%를 재생에너지로 공급하겠다는 목표를 발표하였으나 이는 재생에너지 원별 잠재량 산정결과로부터 도출된 목표이기보다는 다른 나라의 목표와 국제적인 온실가스 배출량 저

감 등의 국제정세를 고려하여 선정된 수치에 가깝다. 따라서 현재 설정된 보급목표가 과연 기술적으로 달성 가능한 현실적인 목표인가에 대한 의문이 제기되고 있는 상황이다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 정책수립을 위한 핵심자료로서의 풍력자원 잠재량을 시급하게 제공하기 위하여 현재 작성이 진행 중인 국가바람지도의 중간결과물과 지리정보자료를 이용하여 예비적으로 남한의 육·해상 풍력자원 잠재량을 산정하였다. 이 과정에서 잠재량 산정의 핵심요인을 파악하고 불확도(uncertainty) 요인을 최소화 함으로써 궁극적으로는 신뢰도 높은 풍력자원 잠재량 산정체계가 구축될 것으로 기대된다.

2. 풍력자원 잠재량 산정

2.1 풍력자원 잠재량 정의

기존의 남한 풍력자원 잠재량 산정사례를 검토한 바에 의하면, 체계적인 잠재량 산정 연구가 없었으며 몇몇 사례도 주관적인 잠재량 정의(definition)와 부정확한 풍력자원 예측방식에 의해 산정수치를 신뢰하기 힘들다. 따라서 우선적으로 과학적이고 합리적일뿐 아니라 학술적으로 유관분야에서 통용이 되는 잠재량 정의가 필요하다.

본 연구에서는 문헌조사를 통해 van Wijk & Coelingh(1993)¹⁾, World Energy Council(1994)²⁾ 등을 거쳐 Hoogwijk et al.(2004)³⁾에 와서 정립된 재생에너지 잠재량의 포괄적 정의를 채택하되 원단위 통일⁴⁾, 육·해상 구분 등 일부를 수정하였다.

본 연구에서 수정·채택한 풍력자원 잠재량의 단계별 정의는 다음과 같다. 참고로 하위 정의는 상위 단계에서 정의된 제약조건을 그대로 승계하며 상세화되는 구조이다.

- (1) 이론적 잠재량(theoretical potential)
영토 및 영해에 존재하는 전체 풍력자원량
- (2) 지리적 잠재량(geographical potential)
지리적인 제약조건을 고려하여 풍력발전기가 설치될 수 있는 면적에서의 풍력자원량
- (3) 기술적 잠재량(technical potential)
풍력개발 경제성 확보 가능한 바람등급을 갖는 면적에 현재의 풍력발전기 기술수준과 발전효율, 손실요인 등을 적용한 풍력자원량
- (4) 공급가능 잠재량(implementation potential)
주어진 기간 내에 산업적, 정책적 제약조건 하에서 개발 가능한 풍력자원량

2.2 풍력자원 잠재량 산정법

풍력자원 잠재량 단계별로 개발이 가능한 지역을 판정하는 기준과 잠재량을 계산하는 방법을 설명하면 다음과 같다.

- (1) 이론적 잠재량
이론적 잠재량은 남한 영토 및 영해 전체 면적을 대상으로 육·해상을 구분하여 산정하였다. 단위면적당 이론적으로 뽑아낼 수 있는 풍력자원량 즉, 평균축출풍력(API; Average Power Intercepted, MW/km²)을 다음 식과 같이 정의하였다.

$$API = WPD \cdot A / A_{WT} \quad (1)$$

여기서 WPD는 풍력밀도(Wind Power Density, MW/m²)로 수치바람모의로 구축된 국가바람지도로부터 주어지며, A는 풍력발

1) van Wijk, A.J.M. and Coelingh, J.P., Wind Energy Potential in the OECD Countries, Utrech University, Netherlands, 1993.
 2) World Energy Council, New Renewable Energy Resources, A Guide to the Future, London Kogan Page Lmt., 1994.
 3) Hoogwijk, M. et al., Assessment of the Global and Regional Geographical, Technical and Economic Potential of Onshore Wind Energy, Energy Economics, Vol. 26, 2004.
 4) 잠재량 원단위는 연간에너지생산량(AEP, TWh/yr)으로 통일하였음.

전기 회전자 면적($=\pi D^2/4$, m^2), D 는 회전자 직경(m), A_{WT} 는 풍력발전기 단위차지면적(unit area occupied by a wind turbine, km^2)이다. 참고로 A 는 지표면과 수직인 평면이며 A_{WT} 는 지표면과 평행한 평면이다.

풍력자원의 산출고도는 현재 대부분의 육·해상용 풍력발전기의 허브높이인 80m로 설정하였고 풍력발전기의 설치배열(array layout)은 풍력발전기간 상호간섭을 완전히 배제할 수 있는 간격인 $10D \times 10D$ 로 가정하였다. 참고로 풍력발전기 회전자 직경은 식 (1)에서 상쇄되므로 잠재량 산정에 영향을 미치지 않는다.

국가바람지도의 풍력밀도를 이용하여 계산한 API 의 평균값은 육상 $3.8 \pm 1.1 MW/km^2$, 해상 $3.9 \pm 0.5 MW/km^2$ 로, 이는 Hoogwijk et al.의 $4 MW/km^2$, NREL⁵⁾의 $5 MW/km^2$ 와 유사한 수치이다. 육상에서는 지형지물 감속요인으로 인하여 해상에 비하여 API 평균이 낮고 분산이 크게 나타났다.

일단 API 가 산정되면 다음의 식으로부터 연간에너지생산량(AEP ; Annual Energy Production, TWh/yr)을 구할 수 있다.

$$AEP = API \cdot FLH \cdot CF \cdot \eta_a \cdot \eta_w \quad (2)$$

여기서 FLH (Full Load Hour)는 8,760hr이고 CF 는 설비이용률(Capacity Factor), η_a 과 η_w 는 각각 설비가동률(availability)과 배열효율(array efficiency)이다. 설비이용률은 풍력발전기의 성능곡선(power curve, P MWh)과 바람지도의 풍속빈도(wind speed frequency, f)로부터 다음과 같이 계산된다.

즉,

$$CF = \frac{1}{WTC} \int_{V_{in}}^{V_{out}} f(V) \cdot P(V) dV \quad (3)$$

여기서 WTC (Wind Turbine Capacity)는 풍력발전기 정격출력이며, V_{in} 와 V_{out} 는 각각 시동풍속(cut-in wind speed)과 종단풍속(cut-out wind speed)이다.

(2) 지리적 잠재량

지리적 잠재량은 지리정보체계 배제분석(GIS exclusion analysis)으로 산출되었다. 즉, 육상의 지리적인 제약조건은 도시, 수계(water body), 도로, 국립공원, 급경사지 등이다. 환경부의 토지피복도(land cover), 수치고도모형(DEM; Digital Elevation Model) 과 선도소프트의 전국도로망 주제도를 이용하여 지리정보체계 하에서 개발 불가능지역을 제외하되 완충영역(buffer)을 고려하였다.⁶⁾

한국의 풍력발전 단지개발의 경험에 의하면 단지개발 시 지역주민 수용성 등의 여러 장애요인이 존재한다. 이러한 현실을 반영하여 육상 개발 가능지역 판정 시 매우 보수적인 기준을 적용하였으며(완충거리 1km), 그 결과 육상의 경우 국토의 10% 정도가 개발 가능한 것으로 판정되었다.

해상의 경우에는 수심, 이안거리, 해상국립공원 등의 제약조건을 고려하였다. 수심은 30m 이하인 경우만 가능하다고 판정하였고, 해안으로부터의 이안거리는 5km 이내에는 경관, 양식장, 선박통행 등의 문제로 개발 불가능으로 제외하였으며 25km 이상인 경우에는 전력선 연계비용 상승을 고려하여 제외하였다. 그 결과 해상의 경우 영해의 20% 정도가 개발 가능한 것으로 판정되었다.

해상의 범위는 좁은 의미에서 영해만을 고려하였으나 해외사례를 보면 배타적 경제수역(EEZ)에서의 개발도 가능하며 심해(deep water) 풍력발전의 가능성이 증대되고 있어 향후 해상 잠재량은 대폭 상향조정되리라 예상된다. 그림 1은 남한 해상 지리적 잠재량

5) Elliot, D.L. and Schwartz, M.N., Wind Energy Potential in the United States, Pacific Northwest Laboratory, PNL-SA-23109, 1993. 그 외 풍력자원 잠재량 산정 관련 NREL 학술문헌 다수

6) 개발 불가능 지리요소(geographical feature)로부터 완충거리(buffer distance)까지의 영역을 모두 개발 불가능 영역으로 처리함.

산정을 위해 영해로부터 개발가능 해역 축출 결과를 보여주는 지도이다.



그림 1. 남한 영해(회색) 및 개발가능 해역(검은색)

(3) 기술적 잠재량

잠재량 산정에 있어서 부적합지 배제분석만으로 설비용량의 산정이 가능하지만 발전량을 산출하기 위해서는 에너지전환장치 즉, 풍력발전기 제원, 성능곡선, 손실 등의 정보가 필요하다. 또한 지리적 잠재량 산출과정에서 적합지로 판별되었다고 하더라도 풍력발전 경제성 측면에서 바람등급(wind class)⁷⁾ 3등급 이상이어야 한다는 제약조건이 부과되어야 한다.

본 연구에서는 육상 국산풍력발전기 보급기종은 2MW, 해상 국산풍력발전기 보급기종은 3MW로 설정하였으나 현재 개발 중인 풍력발전기의 상세자료의 입수가 어려운 관계로 기술적 잠재량은 바람등급에 대한 제약조건만을 고려하였다.

(4) 공급가능 잠재량

Hoogwijk et al.은 공급가능 잠재량 이전에 경제적 잠재량(economic potential)을 정의하였으며, 그 중 주어진 기간 내에 현재의 풍력발전 기술수준, 산업여건, 정책적인 제약

조건 등을 고려하여 산정하였다. 그러나 본 연구에서는 대체방법으로 풍력보급 선진국의 개발실적을 참조하여 공급가능 잠재량을 산정하였다. 즉, 유럽 풍력보급 선진국가인 덴마크, 독일, 네델란드의 개발가능 면적⁸⁾과 누적설비용량으로부터 풍력발전기 설치밀도(installation density)를 계산하였으며⁹⁾, 이를 반영한 API를 적용하여 보급가능 잠재량을 지리적 잠재량의 1/8 수준으로 추산하였다.

이러한 방법을 적용한 이유는 풍력보급 선진국들 수준까지 풍력발전을 공급하는 과정에서 발생할 수 있는 기술적, 산업적, 정책적 제반 문제는 그 국가들의 기술개발보급 경험으로부터 배워서 우리도 해결 가능하다고 판단하였기 때문이다.

2.3 국가바람지도의 활용

풍력자원 잠재량 산정 시 가장 중요한 핵심자료는 풍력자원의 공간정보이다. 본 연구에서는 수치바람모의를 통하여 구축하고 있는 국가바람지도의 중간 결과물인 중해상도(medium-resolution) 바람지도를 활용하였다. 중해상도(공간해상도 3km×3km) 바람지도는 최종적으로 구축 완료될 고해상도(공간해상도 1km×1km) 바람지도의 이전 단계이나 지면기상 관측자료와의 기상학적인 검증과정을 통해 신뢰도를 확인하였다.

문헌조사에 의하면 기존의 풍력자원 잠재량 산정의 경우, 바람지도 대신 지면기상 관측자료를 이용하여 풍력밀도의 공간분포를 추정하는 사례가 대부분이다. 지면기상 관측자료를 허브높이로 수직 외삽보간(extrapolation) 및 수평공간 내삽보간(interpolation)할 경우 필연적으로 복잡한 가정의 도입되며 특히 우리나라와 같은 복잡지형에서는 보간 과정에서 수

7) U.S. NREL, Wind Energy Resource Atlas of the United States, U.S. DOE, 1986.

8) Hoogwijk, M. et al., Assessment of the Global and Regional Geographical, Technical and Economic Potential of Onshore Wind Energy, Energy Economics, Vol. 26, 2004.

9) 덴마크, 독일, 네델란드가 각각 0.53, 0.46, 0.31MW/km²

용하기 힘든 수준의 예측오차가 발생한다.¹⁰⁾
 11) 이에 본 연구에서는 수치바람모의로 작성되고¹²⁾ 기상통계학적으로 검증된¹³⁾ 국가바람지도를 활용함으로써 풍력자원 잠재량 산정의 정확도 및 신뢰도가 대폭 향상될 것으로 판단된다. 참고로 그림 2는 중해상도 국가바람지도를 구글어스(Google EarthTM)에서 활용할 수 있도록 가공한 KIER-WindMapTM 표출예이다.

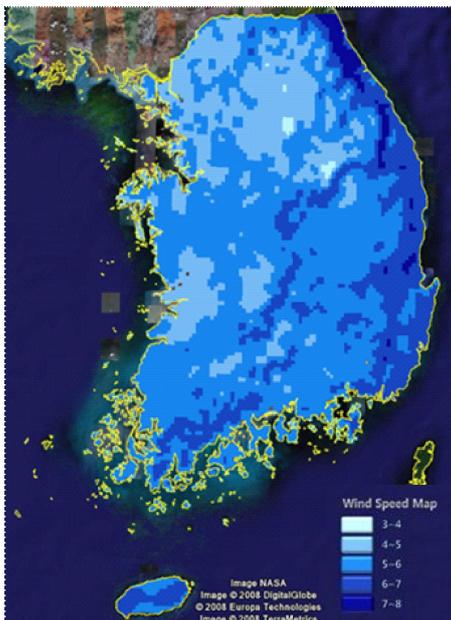


그림 2. 중해상도 국가바람지도

3. 잠재량 산정결과 및 토의

남한 육·해상 풍력자원 잠재량 산출결과

- 10) 김현구, 포항지역 풍속전단 형태분석과 측정-보정-예측법의 응용, 한국신재생에너지학회지, 1권 2호, 2005.
- 11) 김현구, 최재우, 이화운, 정우식, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료에 의한 중관 바람지도 구축, 한국신재생에너지학회지, 1권 1호, 2005.
- 12) 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 김동혁, 최현정, 수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축, 한국태양에너지학회 논문집, 26권 4호, 2006.
- 13) 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석, 한국대기환경학회, 23권 6호, 2007.

를 표 1에 정리하였다.

바람은 태양에너지 불균등 지표면 가열에 의한 온도차로부터 형성되는 기압구배에 의해 유도되며, 지표면에 입사되는 태양에너지와는 달리 지표면과 평행하게 불기 때문에 이론적 잠재량을 산출하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이론적인 풍력자원 잠재량을 말할 때는 King Hubbert¹⁴⁾의 이론적 추산을 인용한다. 즉, 풍력 잠재량은 지표면에 도달하는 태양에너지의 2% 수준으로 추산하는 것이 통념이다.

남한 영토에 입사되는 태양에너지 이론잠재량¹⁵⁾은 44,638TWh/yr, 그 2%는 893TWh/yr이며, 이는 본 연구에서 산정한 표 1의 이론적 잠재량 987TWh/yr와 유사한 수치이다. 이러한 검토로부터, 바람지도로부터 API를 계산하여 이론적 잠재량을 산정한 본 연구의 산정방법이 이론적으로도 유의한 계산결과를 도출하였음을 확인하였다.

참고로 표 1에서 기술적, 공급가능 잠재량 중 연간에너지생산량은 향후 국산 풍력발전기의 성능곡선 등 계산에 필요한 자료가 확보되고 고해상도 국가바람지도가 완성되는 시점에 재산정될 것이므로 본 논문에서는 설비용량과 개발가능 면적만을 제시하였다.

기술적 잠재량 중 설비용량을 다른 나라의 산정자료와 비교하여 보면, 미국¹⁶⁾ 육상 500GW, 해상 1,000GW, 중국¹⁷⁾ 육상 250GW, 해상 750GW, 일본¹⁸⁾ 해상 250GW, 인도¹⁹⁾ 육상 65GW, 덴마크²⁰⁾ 해상 8GW, 영국 해상 70GW,

- 14) King Hubbert, M.K., The Energy Resource of the Earth, Energy and Power, 1971.
- 15) 신재생에너지센터, 2005년도 신재생에너지백서, 산업자원부, 2006.
- 16) Musial, W., Offshore Wind Energy Potential for the United States, Wind Powering America - Annual State Summit, 2005.03.
- 17) Chan, K.K., Renewable Energy Development in Asia Pacific, CLP Renewables, China, 2007.
- 18) Kogaki, T. et al., Technical and Economic Aspects of Offshore Wind Energy Development in Japan, Proc. of The 13th Int'l Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, 2003.
- 19) IWTMA(Indian Wind Turbine Manufacturers Association), <http://www.indianwindpower.com/>, 2005.
- 20) Barthelmie, R. et al., Offshore Wind Potential in Europe and

독일 해상 13GW로 본 연구에서 산정한 잠재량이 타 국가의 잠재량을 국토면적의 비율을 고려하여 비교할 때 유의한 범위 내에 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

표 1. 남한 육·해상 풍력자원 잠재량 산정결과

분류		단위	육상	해상
이론적 잠재량	잠재량	TWh/y	987.0	880.8
	용량	GW	369	309
	면적	km ²	97,545	79,549
지리적 잠재량	잠재량	TWh/y	98.7	176.2
	용량	GW	36.9	62.8
	면적	km ²	9,754	15,910
기술적 잠재량	잠재량	TWh/y	-	-
	용량	GW	18.5	31.4
	면적	km ²	4,877	7,955
공급가능 잠재량	잠재량	TWh/y	-	-
	용량	GW	4.6	7.9
	면적	km ²	1,219	1,989

4. 결 론

남한의 풍력자원 잠재량을 수치바람모의에 의해 작성된 중해상도 국가바람지도와 지리정보시스템을 이용하여 육·해상을 구분하여 산정하였다.

본 연구의 결론을 요약하면,

- (1) 잠재량을 각각 이론적, 지리적, 기술적 및 공급가능 잠재량의 4 단계로 정의하였다. 특히 기존에는 산정이 어려웠던 이론적 잠재량을 바람지도로부터 계산된 API를 도입하여 계산하였으며 그 결과 King Hubbert의 이론과 유사한 추산 결과를 얻었다.
- (2) 부적합지 배제분석에 의해 추산된 육·해상 지리적 잠재량은 이론적 잠재량의 각각 10% 및 20%이며, 기술적 잠재량은 지리적

- (3) 공급가능 잠재량은 유럽의 육상풍력 설치용량으로부터 도출된 공급비율 경험값을 적용하여 산출하는 방식을 제안하였다. 이렇게 계산한 바에 의하면 육·해상 공급가능 잠재량은 지리적 잠재량의 1/8 수준인 총 12.5GW 규모로 추산되며, 이는 국가에너지기본계획 2030에서 제시된 풍력 보급목표인 7.3GW의 1.7배로 정부에서 설정한 보급목표가 충분히 달성 가능함을 확인할 수 있다.
- (4) 지면기상 관측자료를 보간하여 풍력밀도 공간분포를 추정된 기존방식에 비해 본 연구에서는 수치바람모의로 구축되고 기상통계분석으로 검증된 바람지도를 활용함으로써 특히 북잡지형에서의 잠재량 산정 시 예상되는 오차를 대폭 경감하였다.

본 연구를 통하여 남한 풍력자원 잠재량 산정방법이 체계화 되었으므로, 다음 단계로 현재 개발 진행 중인 국산 풍력발전기 전 기종에 대한 규격 및 성능곡선 등의 기술자료 및 고해상도 국가바람지도를 적용하여 정확한 잠재량을 산정하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 신재생에너지 기술개발사업 중 「한반도 해역 고해상도 바람지도 구축 및 단지개발 적합성 평가시스템 개발」에 의해 수행되었습니다.

중해상도 바람지도는 상기 사업 중 위탁과제로 부산대학교 대기과학과(이화운 교수)에서 작성한 것이며, 토지피복도 가공 시 황효정, 윤창열 연구원과 선도소프트의 도움이 있었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 김현구, 포항지역 풍속전단 형태분석과

Review of Offshore Resource Modeling Techniques, Proc. of European Wind Energy Conference, 2008.

* 이하 영국, 독일 잠재량은 동일한 참고문헌임.

- 측정-보정-예측법의 응용, 한국신재생에너지학회지, 1권 2호, 2005.
2. 김현구, 최재우, 이화운, 정우식, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료에 의한 종관 바람지도 구축, 한국신재생에너지학회지, 1권 1호, 2005.
 3. 김현구, 이화운, 이종찬, 한반도 바람지도 구축 및 활용, 그린사랑 워크샵, 산업자원부, 서울 COEX, 2007.
 4. 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 김동혁, 최현정, 수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축, 한국태양에너지학회 논문집, 26권 4호, 2006.
 5. 에너지관리공단 신재생에너지센터, 2005년도 신재생에너지백서, 산업자원부, 2006.
 6. 에너지관리공단 신재생에너지센터, 신재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈 - 풍력, (주)북스힐, 2008.
 7. 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석, 한국대기환경학회, 23권 6호, 2007.
 8. Barthelmie, R. et al., Offshore Wind Potential in Europe and Review of Offshore Resource Modeling Techniques, Proc. of European Wind Energy Conference, 2008.
 9. Chan, K.K., Renewable Energy Development in Asia Pacific, CLP Renewables, China, 2007.
 10. Elliot, D.L. and Schwartz, M.N., Wind Energy Potential in the United States, Pacific Northwest Laboratory, PNL-S A-23109, 1993.
 11. Hoogwijk, M. et al., Assessment of the Global and Regional Geographical, Technical and Economic Potential of Onshore Wind Energy, Energy Economics, Vol. 26, 2004.
 12. King Hubbert, M.K., The Energy Resource of the Earth, Energy and Power, 1971.
 13. Kogaki, T. et al., Technical and Economic Aspects of Offshore Wind Energy Development in Japan, Proc. of The 13th Int'l Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, 2003.
 14. Musial, W., Offshore Wind Energy Potential for the United States, Wind Powering America - Annual State Summit, 2005.03.
 15. van Wijk, A.J.M. and Coelingh, J.P., Wind Energy Potential in the OECD Countries, Utrecht University, Netherlands, 1993.
 16. World Energy Council, New Renewable Energy Resources, A Guide to the Future, London Kogan Page Lmt., 1994.