

## 論 文

## 국내 적용을 위한 해수 담수화 경제성 분석

**An Economic Analysis of Desalination for Potential Application in Korea**

박노석\* · 박희경\*\* · 박미현\*\*\* · 김병덕\*\*\*\*

Park, No Suk\* · Park, Hee Kyung\*\* · Park, Mi Hyun\*\*\* · Kim, Byung Duck\*\*\*\*

**Abstract**

Korea becomes one of the countries which suffer from water shortage. It is expected that its water shortage in the early 2000's will be more than 10% of the annual demand. The shortage problem is more serious in the coastal areas where many industry complex locate. To solve the shortage problem, seawater desalination gets more attention as an alternative water supply source since Korea is surrounded by sea on its three sides. For potential application of seawater desalination in Korea, an economic analysis was conducted using cost data for the plants in the Middle East areas, the United states and others. The study is to provide a basis for the government to establish a strategy for promoting seawater desalination in Korea. It is discussed that the Reverse Osmosis (RO) process gets cheaper over times than the thermal processes of Multi-stage Flash Distillation (MSF) and Multi Effect Distillation (ME), especially in case where the capacity is less than about 50,000 ton/day. The unit cost of RO seawater is analyzed about US\$1.35/ton in 1990 price. Since the Desalination plant can be operated regardless of weather conditions, industries in Korea's coastal areas which suffer from frequent droughts and water shortages are recommended to look into this option with more attention.

**I. 서 론**

- \* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
- \*\* 한국과학기술원 토목공학과 교수
- \*\*\* 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
- \*\*\*\*한국기계연구원 산업설비연구부장

인구 증가와 산업화로 인해 전세계의 물 부족 사태는 매년 심각해지고 있으며, 현재 전 세계 인구 중 40%가 식수난을 겪고 있다. 우리나라 마찬가지로 물Scarce국으로 분류되어

있으며, 해마다 국부적으로 갈수 문제가 심각하다. 우리 나라의 연간 1인당 강수량은 약 3000톤으로 세계 평균의 1/11에 불과한 실정이다. 강우 또한 불균등하게 분포되어 연 강수량의 2/3가 여름철인 6월에서 9월 사이에 집중되어 있으며, 10월부터 다음 3월까지의 강수량은 연 강수량의 1/5에 불과하여 계절적 편중이 매우 심하다.<sup>1)</sup> 이러한 현상으로 인해 수자원을 적절하게 관리하고 조절하는 것이 힘들며, 수자원공사의 발표에 따르면, 21세기초에는 10% 이상의 물 부족 사태가 발생할 것이다.<sup>1)</sup>

따라서, 새로운 물 공급원을 개발하는 것이 시급한 당면 과제이며, 이에 대한 해결책으로 댐 건설, 지하수 개발, 하수 재이용, 담수화 등이 거론되고 있다. 댐 건설에 있어 2011년까지 30개 이상의 댐이 건설될 계획이나, 이는 환경적으로 악영향을 미칠 수 있으므로 바람직하다고 볼 수 없으며, 국내 지형상 대수충이 빈약하여 대규모의 지하수 개발을 기대하기도 어렵다. 소규모 지역적인 물 공급원으로 하수 재이용이 각광받고 있으나, 현재에는 물 공급원으로서의 측면보다는 수질 보전의 측면으로 부각되는 면이 훨씬 강한 형편이다. 이런 실정에서 삼면이 바다로 둘러싸여 있고, 공업단지가 해안지역에 밀집되어 있는 국내 현실을 감안할 때, 기존 수자원의 보조 개념으로서 담수화 도입을 검토할 필요가 있다고 생각된다. 증가하는 물 수요를 충족시키기에는 기존 수원의 공급 능력에 한계가 있을 것으로 예상되는바, 본 고에서는 이미 담수화 공정을 도입하여 가동중인 외국 사례를 중심으로 그 가능성에 대해 분석해 보고 실제 우리나라에 도입되었을 때의 그 경제성을 평가하려 한다.

## 2. 담수화 공정별 경제성 비교

담수화 공정에는 여러 가지 방법이 있으며, 다단 플래시 증발법 (Multi-Stage Flash Distillation, MSF), 다중효용법 (Multi-effect distillation, ME)과 역삼투법 (Reverse Osmosis, RO)이 그 대표적인 예이다. MSF와 ME는 증

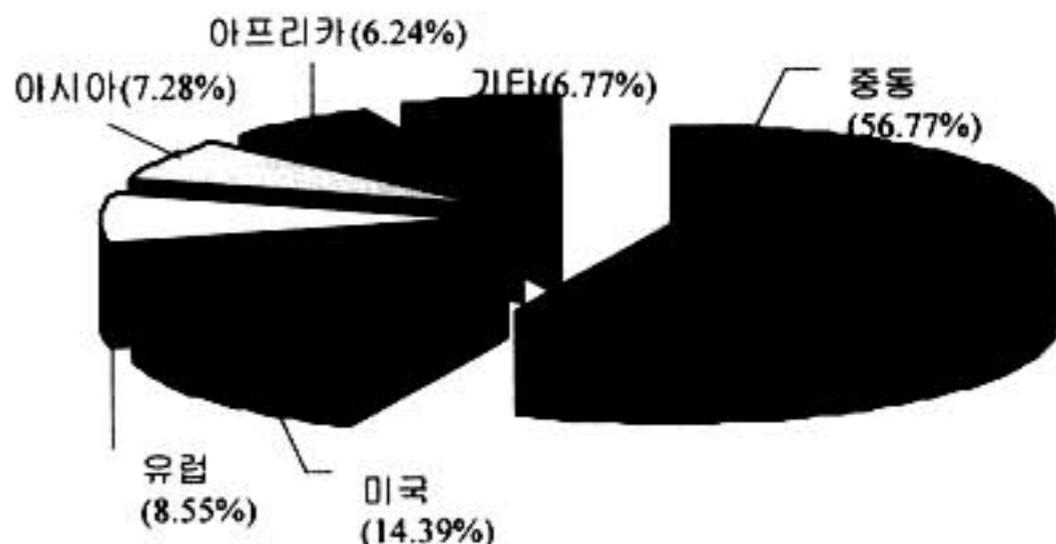


그림 1. 담수화 플랜트의 지역적 분포<sup>2)</sup>

발법에 기초한 방법이며, RO는 막 기술에 의한 것이다. 어느 공정이 적절한 것인가는 용량, 설치 부지, 에너지 비용, 유입수질과 요구되는 생산수질에 따라 결정된다. 이를 인자에 대한 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 가격 비교를 통한 경제적 분석이 수반되어야 한다. 이 장에서는 MSF, ME와 RO의 경제성을 비교하고자 한다. 앞에서도 언급했듯이, 국내에서 어느 정도 규모의 해수 담수화 플랜트가 건설된 적이 없으므로 모든 자료는 기존의 국외 담수화 플랜트에 관한 문헌을 토대로 작성되었다. 플랜트의 대부분은 중동지역과 미국, 인도에 설치된 것들이다. 다음 그림 1은 담수화 플랜트의 지역적인 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 미국과 중동지역에서 가장 많이 밀집되어 있음을 알 수 있다.<sup>2)</sup>

### 2. 1. MSF, ME와 RO의 경제성 비교

경제성 평가의 주요 인자로 자본 비용과 O&M 비용을 들 수 있다. 자본 비용은 직접 자본 비용과 간접 자본 비용으로 나뉘며, 전자에는 대지 비용, 건설비, 시설비, 전기 설비, 수처리, 전력 공급 등이 포함되며, 후자에는 건설기간 중 이자, 관리비, 인건비 등이 포함된다. O&M 비용은 유지 인건비, 행정비용, 유지 재료, 화학약품, 연료, 전기전력비용 등이 포함된다.

모든 비용은 US 달러를 사용하여 표시하였다. 올바른 경제성 평가를 위해 모든 비용은 같은 연도를 기준으로 평가되어야 하므로, 본 연구에서는 미국 생산자 단가 지수에 의한

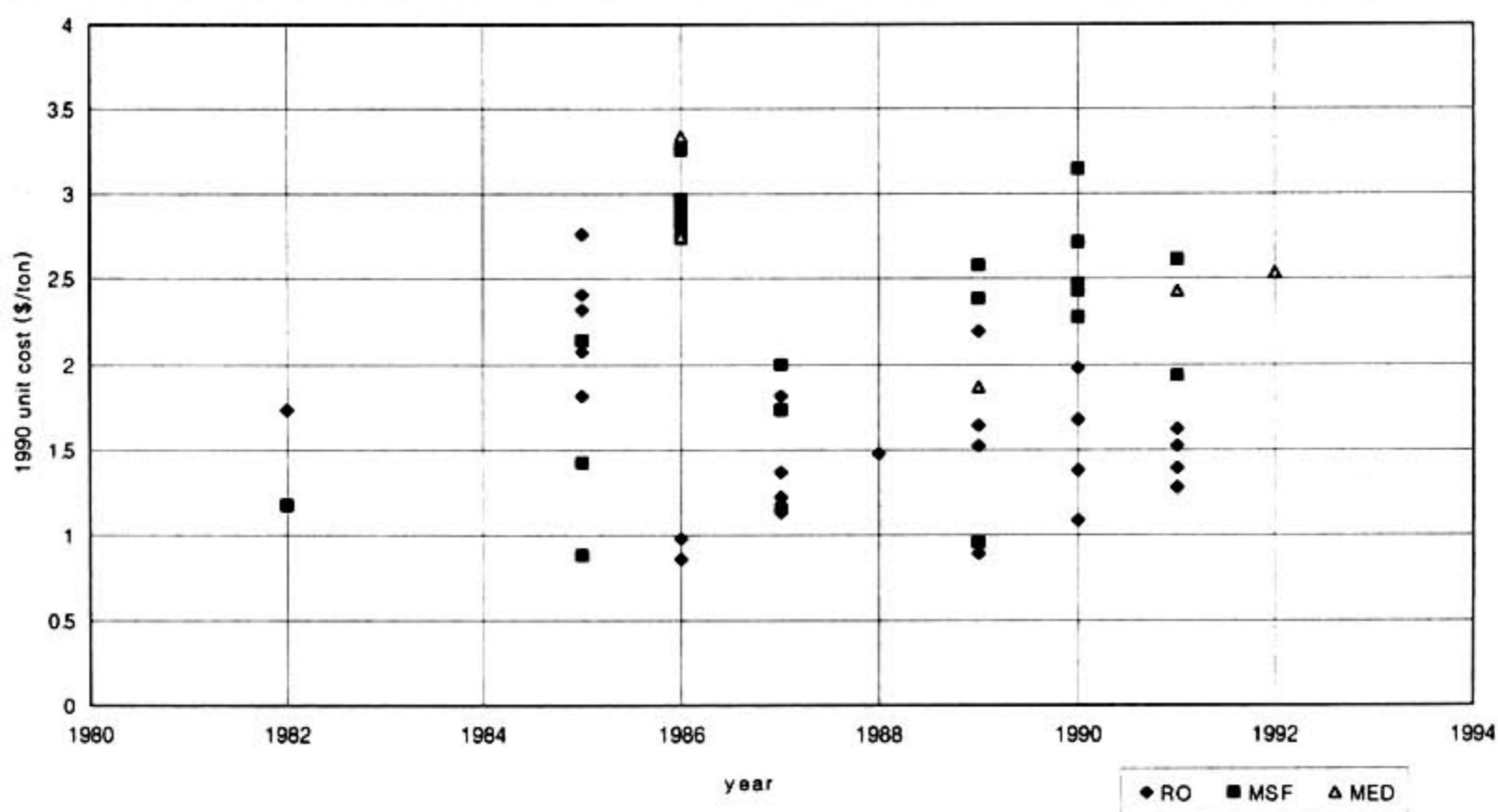


그림 2. 담수화 플랜트별 1990년도 환산가격의 연도별 분포<sup>3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)</sup>

1990년도 환산가격을 지표로 설정하였다. 또한, 자본비의 상환금액을 위한 경제적 수명은 20년, 이자율은 8%로 가정하였다.

그림 2는 담수화 플랜트의 1990년도 환산가격의 연도별 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, MSF와 RO 모두 시간이 지남에 따라 단위 비용이 감소하는 경향을 보이고 있으나, ME에 관한 자료의 수가 적어 그 경향을 단정하기에는 다소 무리가 있다. 1980년대 중반까지 RO의 비용이 MSF의 비용보다 높은 것으로 나타났다. 1982년의 경우 사우디아라비아에서의 RO 비용은 MSF 비용의 1.5배에 이르고, 1985년의 경우 인도의 RO 단위 비용은 MSF비용의 1.3~2.4배에 이르며, 이는 용량과 반비례 관계이다. 즉, 1,200톤/일의 경우 1.3배, 3,785톤/일의 경우 1.9배, 18,925톤/일의 경우 2.4배로 나타났다. 1980년대 중반 이후, MSF와 ME의 비용이 RO 비용보다 높아지는 경향을 보이며, 1989년 쿠웨이트의 경우 MSF의 단위비용이 RO의 1.6배로 나타났다. 이러한 경향은 1990년대까지 지속되며, 미국의 경우 RO의 단위비용은 \$1.5/톤인데 비해, 쿠웨이트의 경우 MSF의 단위비

용은 \$2~2.6/톤에 이르고 있다. 주지하는 바와 같이 RO의 단위 비용은 계속하여 감소하는 추세를 보이고 있는데, 이는 막 제조기술 및 기타 설비 기술의 발달에서 기인한 것이다. Malek(1996)에 의하면, 앞으로 RO의 단위 비용은 \$1/톤 이하로 감소될 것이며, \$0.8/톤 이하의 가격을 얻는 것도 가능하다고 보고되었다.

그림 3은 단위비용의 지역적인 분포를 보인 것으로, 이는 국내에 담수화를 적용하기 위해 지역적인 영향을 평가하기 위한 것이다. 그림과 같이, 지역에 따른 경향은 파악하기 힘들다. 각 지역마다 경제성에 영향을 미치는 인자는 다르며, 이들이 결합하여 총 단위비용을 구성할 때, 지역간의 편차는 그리 크지 않다. 예를 들어, 막 제조 기술을 보유하고 있지 않은 나라에 대해 미국에서의 막 제조 비용은 낮은데 비해, 미국에서의 임금은 기타지역보다 높다. 결과적으로 지역적 변화는 총 비용만을 고려할 경우 적절하게 분석하기 어려우며, 총비용을 이루는 개개비용에 대한 분석이 추후에 이루어져야 할 것이다.

담수화 용량에 관한 단위비용 분포는 그림 4

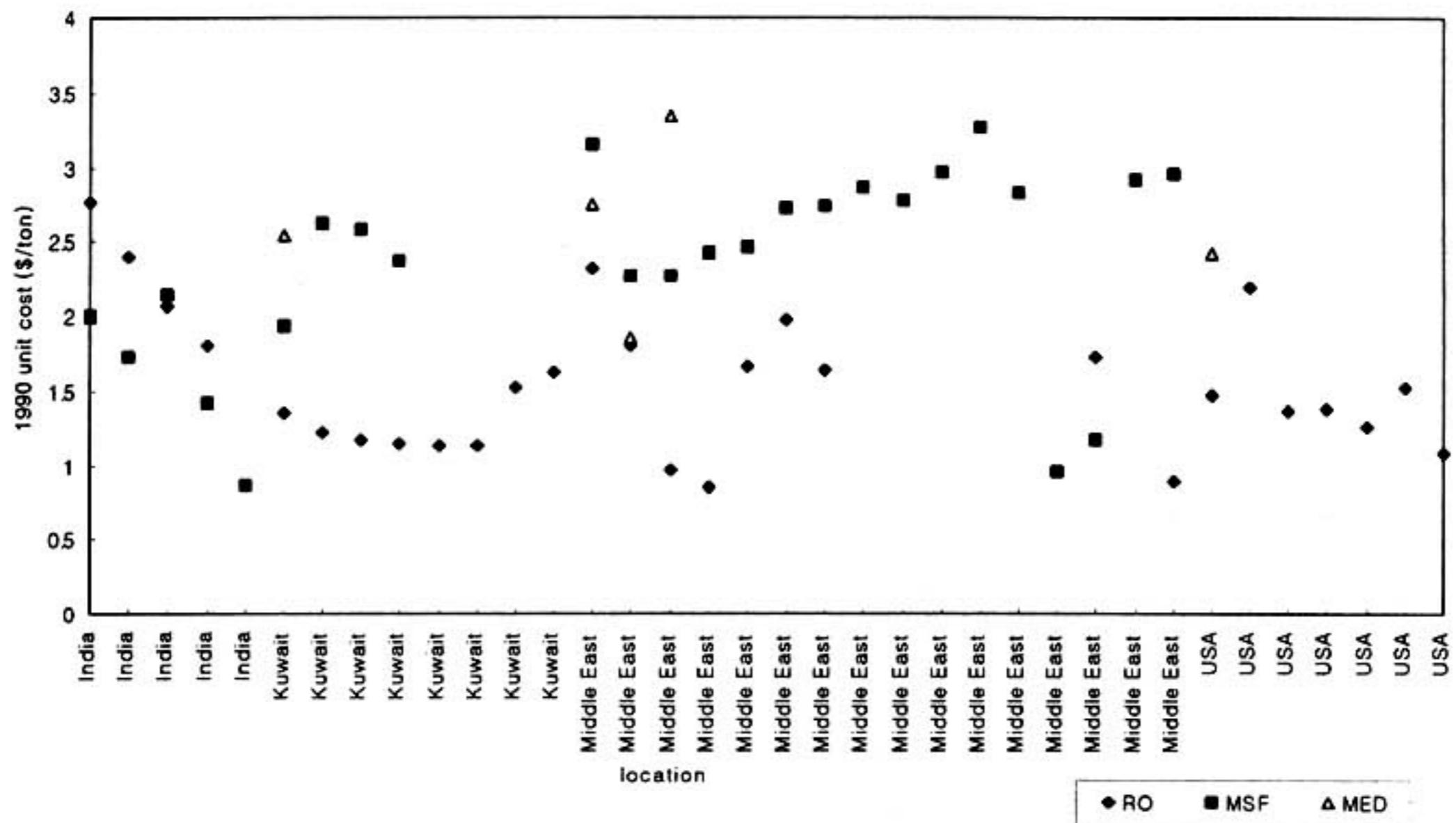


그림 3. 단위비용의 지역적 분포<sup>3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)</sup>

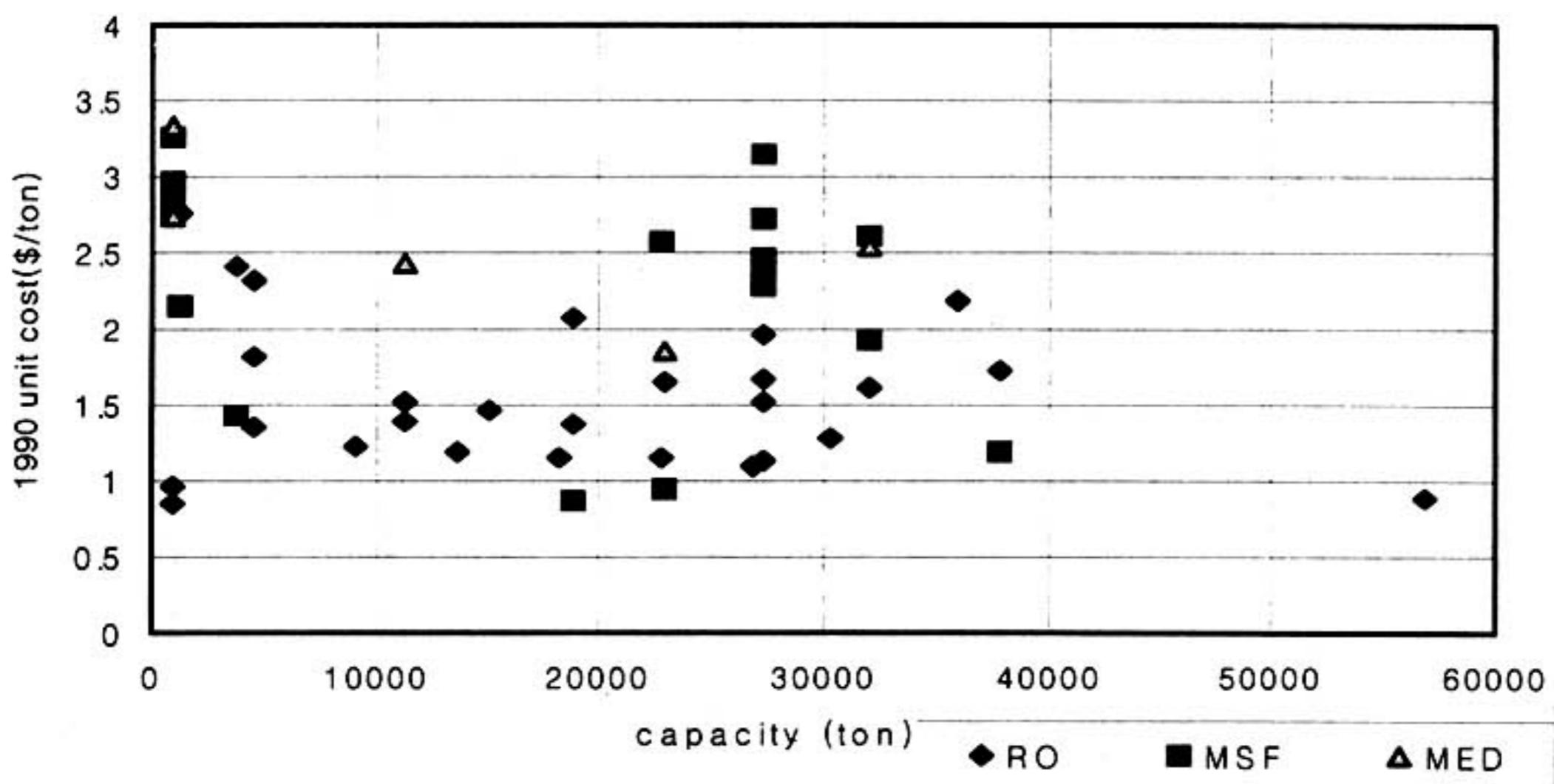
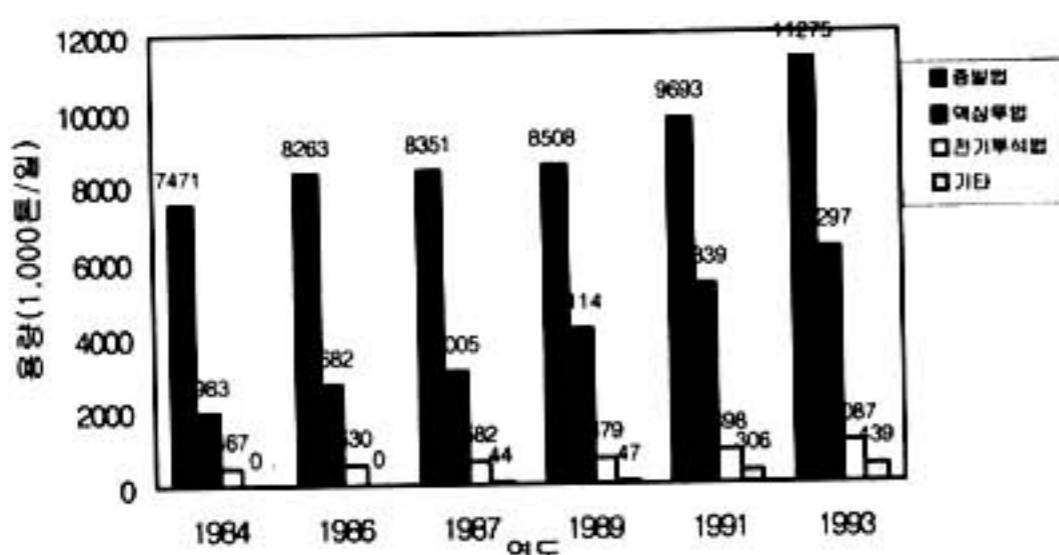


그림 4. 담수화 용량별 단위비용 분포<sup>3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)</sup>

에 나타내었다. 일반적으로 용량이 50,000톤/일 이하의 규모에서는 MSF의 단위비용이 RO의 단위비용보다 높다. 대규모 용량에서의 자

료가 많지 않으므로, 대규모에서의 비교는 그림에 나타내지 않았다. 1,000톤/일의 규모와 같은 극소 규모의 경우 주목할만한 차이가 나

그림 5. 담수화 플랜트의 방식별 설치 추이<sup>2)</sup>

타났는데, RO의 단위비용이 약 \$1/톤인데 비해 MSF의 단위비용은 약 \$3/톤 정도로 MSF의 단위 비용이 RO 단위 비용의 약 3배 정도이다. 20,000~30,000톤/일의 용량에서 MSF의 단위비용이 \$2.5/톤 정도인데 비해 RO의 단위 비용은 \$1~2/톤이다. (56,800톤/일 규모의 경우 RO의 단위비용은 \$1/톤 이하인데, 이는 여타 자료의 생산수의 TDS(Total Dissolved Solid)가 500mg/L인데 비해 이 자료의 경우 1,000mg/L인데서 비롯된 것으로 유출수질이 좋을수록 소요되는 비용이 높다.) 그러므로, MSF의 단위비용은 \$2~2.5/톤이고, RO의 단위비용은 \$1~1.5/톤이며, 용량이 감소할수록 RO가 더 경제적이라는 결론이 얻

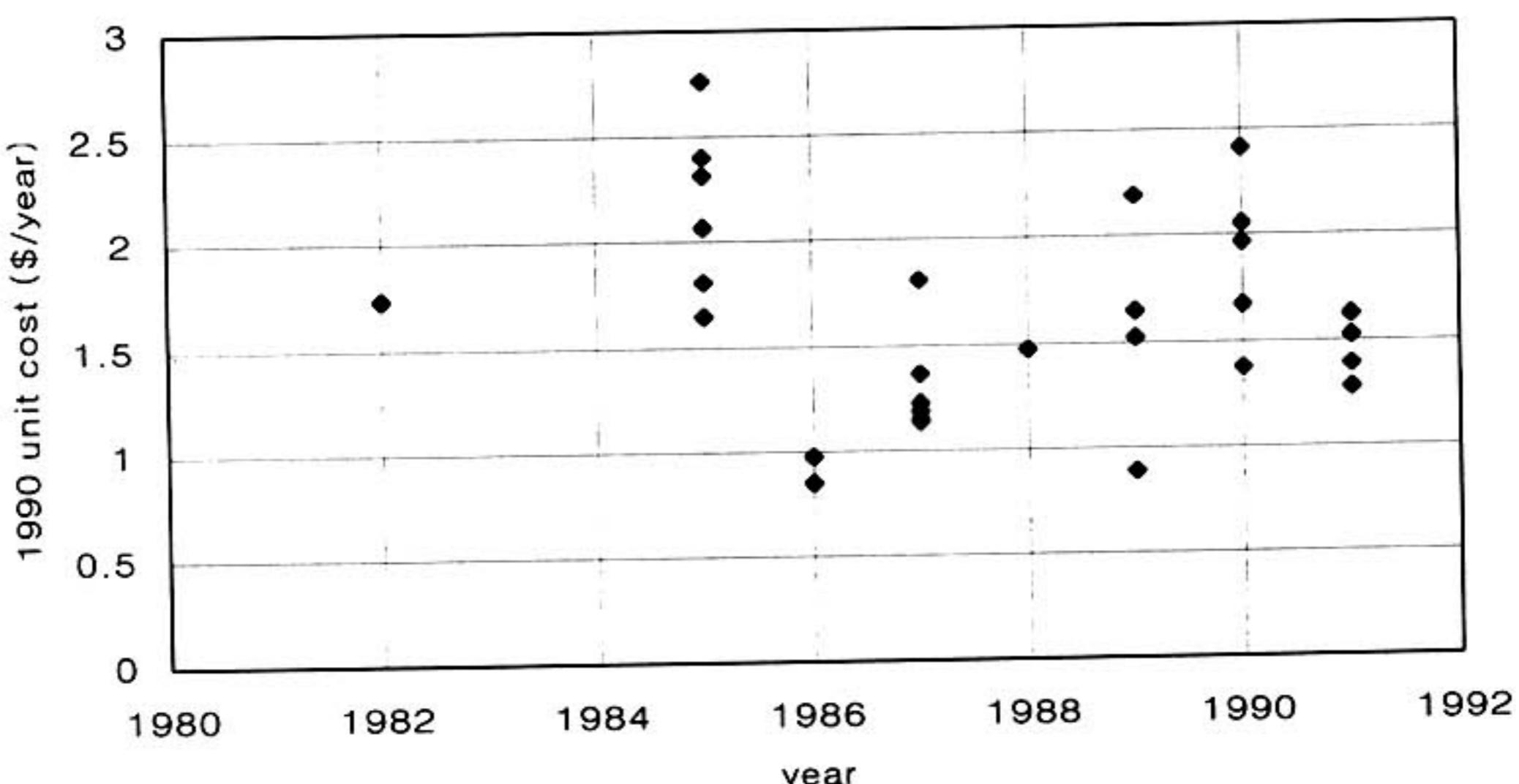
어진다. 이를 증명하듯이, 전세계적으로 RO의 사용량이 증가하는 추세이다.

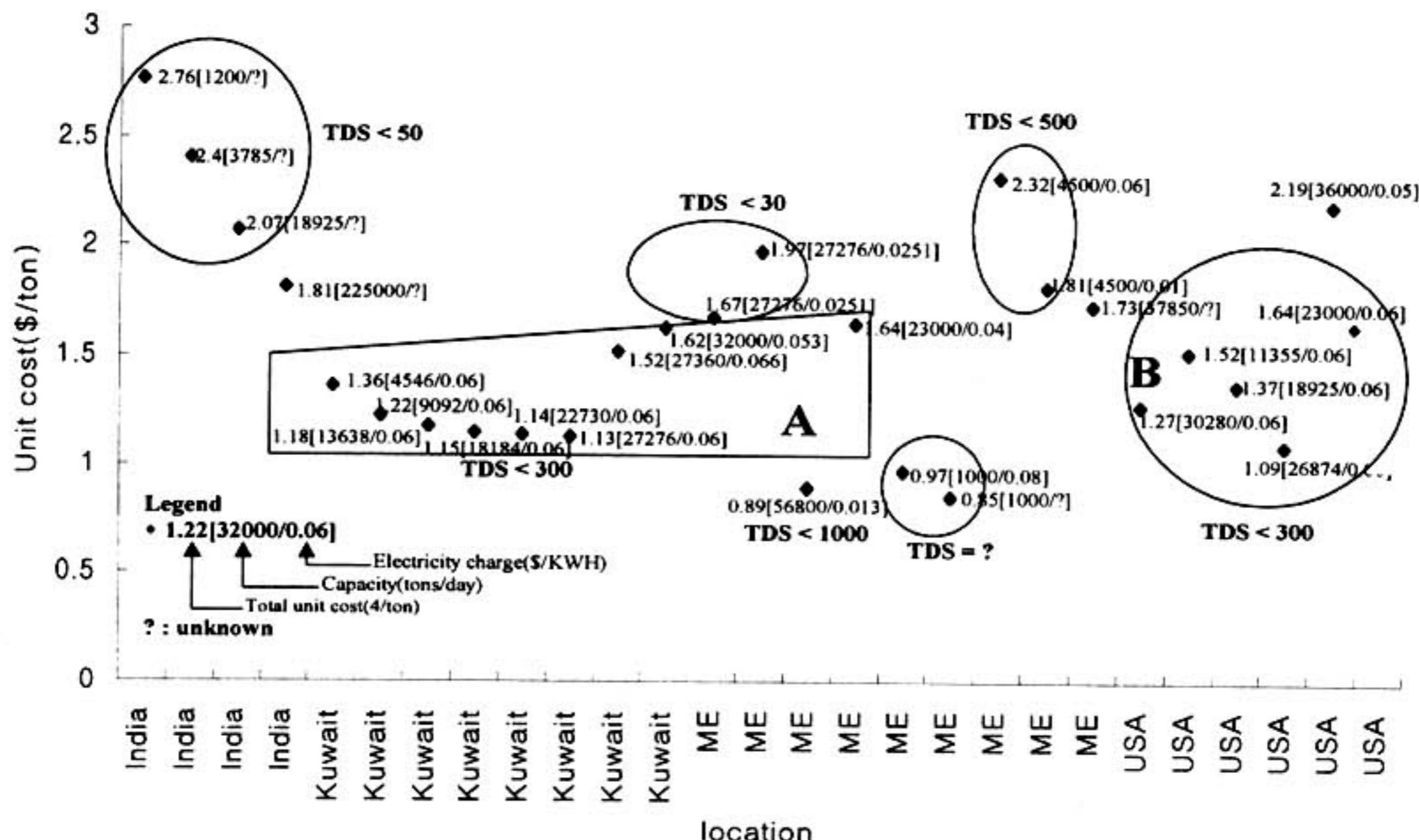
그림 5에서 나타난 것과 같이 RO를 사용하는 플랜트는 1984년부터 1993년까지 약 3배가 넘게 증가된 것에 반해 MSF를 비롯한 다른 공정들은 그 증가추세는 미약하다. 초기의 MSF를 사용하던 방식에서 점차 막 기술의 발전과 동력비 절감방안의 연구 등에 기인해 점차 RO의 사용이 증가하는 것이라 사료된다.

### 3. RO의 도입과 경제성 분석

RO는 50,000톤/일 이하의 규모에서 더욱 경제적인 것으로 나타났으며, 국내에서도 이러한 규모에서는 적용 가능한 것으로 사료된다. 그림 6과 같이 연도별 RO의 경제성을 나타내면, 1980년대 초반의 단위비용은 \$1.5~3.0/톤 범위에 들며, 1980년대 후반의 단위비용은 \$0.9~2.5/톤 범위이며, 이로써 RO의 단위비용이 시간에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 7은 위치별, 수질별, 용량 및 O&M 비용 중 가장 큰 변수가 되는 에너지 비용에 따른 단위비용을 나타낸 그래프이다. 인

그림 6. 연도별 RO의 단위비용 추이<sup>3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)</sup>

그림 7. 에너지 비용 및 담수화 단위비용 분석<sup>3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)</sup>

도에서는 기술력 부재와 삼투막 및 부대 시설의 수입, 높은 수질(TDS<50ppm) 때문에 단위비용이 \$2.0/톤 이상이 되는 반면에, 그림에서 표시한 A군과 B군은 주로 중동과 미국의 플랜트를 포함하며, 그 비용이 \$1.0~1.5/톤으로 평균 \$1.35/톤을 나타내고 있다. 이 범주에 들지 못하는 경우들은 수질이 높게(TDS<50ppm) 나오거나 원수 혹은 다른 조건들이 우리나라와 다르기 때문이다. A군과 B군의 에너지 비용은 평균 \$0.054/KWH 정도이며, 이 가격은 현재 한국의 에너지 비용 \$0.056/KWH와 비슷하다. 그리고 요구되어지는 수질이나 용량 등 다른 부수적인 조건을 감안할 때, 우리나라에 적용 가능한 플랜트와 유사한 점이 많다. 따라서, 해수담수화의 국내 적용을 위한 비용으로 A군과 B군의 가격을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

외국 사례를 통한 국내 해수의 담수화 도입

가능성과 그 경제성 분석에 대한 연구에서 아래와 같은 결론을 도출했다.

(1) 지금도 물압박국으로 분류되고 있는 우리 나라는 21세기에 아주 심각한 물부족 사태를 겪을 것으로 예상되고 있으며, 그 해결책으로 새로운 수자원 개발이라는 시급한 당면 과제를 안고 있는 입장이다. 추가적인 댐 건설, 지하수 개발, 하수 재이용 등이 해결책으로 거론되고 있으나, 그 중에서 해수담수화가 현실적용성에 있어서 경제적인 측면과 환경적인 측면을 동시에 만족하는 대안이 될 수 있다.

(2) 막 제조 기술의 혁신으로 인해 시간이 경과함에 따라 RO의 단위비용은 MSF, ME와 같은 증발식에 비해 낮아질 전망이다. 용량이 증가할수록 증발식 공정의 단위비용이 낮아지고, RO에 비해 경제성이 높아진다. 이렇게 역전되는 점은 용량 50,000~60,000톤/일이며, 이 용량보다 낮을 경우에는 RO공정의 단위비용이 훨씬 저렴하다.

(3) 국내 적용을 고려할 때 자본비와 O&M 비를 포함한 RO의 해수 담수화 비용은 1990년

환산 가격으로 US\$1.0~1.5/톤으로 평균 US\$1.35/톤 정도이다. Kartinen(1993)의 보고에 따르면, 기술적인 발전이 뒷받침되면, 2000년대에는 \$1.0/톤 이하의 단위비용도 가능하다고 한다. 그러나 국내에 막 제조 및 기타 설비 기술이 도입된 역사가 짧기 때문에, 2000년대 초반에 이와 같은 가격이 될 것으로 기대하는 것은 다소 무리가 있으므로, 21세기에 국내에 적용될 RO를 이용한 해수 담수화의 1990년도 환산 가격으로서의 평균 단위비용은 \$1.35/톤을 사용하는 것이 무난할 것으로 사료된다.

(4) 실제 앞선 사례연구에서 언급한 바와 같이, 같은 RO를 적용한다고 하더라도 수질이나, 지역별, 에너지 비용 및 용량에 있어서 그 단위비용은 현격한 차이를 보이고 있다. 국내에서 적용된 때에도 같은 차이를 보일 수 있으므로 상기에 언급된 비용들은 초기 계획 단계에서 대안들의 개략 비교에 사용되어야 할 것이다. 해수담수화 적용 가능 지역이 선정되고 타당성 조사가 시행될 경우에는 자세한 자료를 바탕으로 적용 대상 지역별로 보다 정밀한 경제성 분석이 시행되어져야 한다.

### 참고문헌

1. 한국수자원공사, "숫자로 본 수자원", 1996.
2. 한국수자원공사, "해수의 담수화 방안 연구보고서", 1995.
3. Akashah. S., Abdel-Jawad. M., Abdelhalim. M. M. and Dahdah. J. "Cost and Economic Analysis of DOHA Reverse Osmosis Plant (Kuwait)." *Jour. Desalination*. Vol. 64, pp. 65-82, 1987.
4. Ebrahim. S. and Abdel-Jawad. M., "Economics of Seawater Desalination by reverse osmosis." *Jour. Desalination*. Vol. 99, pp. 39-55, 1994.
5. Gordon. F. L., "Costs of Seawater Desalination in Real Terms, 1979 Through 1989, and Projections for 1999." *Jour. Desalination*. Vol. 76, pp. 201-213, 1989.
6. Gordon. F. L., "Total Water Costs on A Standard Basis for Three Large, Operating, S.W.R.O. Plants." *Jour. Desalination*. Vol. 81, pp. 39-48, 1991.
7. Greig. H.W. and Wearmouth. J.W., "An Economic Comparison of 2×1,000 m<sup>3</sup>/day Desalination Plants." *Jour. Desalination*. Vol. 64, pp. 17-50, 1987.
8. Kartinen. E.O., "Summary and Comparison of Seawater Desalination Projects in California." *Proceedings of Conference, Membrane Technology*. pp. 755-775, 1993.
9. Madani. A.A. "Economics of Desalination for Three Plant Sizes." *Jour. Desalination*. Vol. 78, pp. 187-200, 1990.
10. Malek. A., "Design and Economics of RO Seawater Desalination." *Jour. Desalination*. Vol. 105, pp. 245-261, 1996.
11. Morin. O.J., "Process Optimization for A 6.0 MGD Seawater Reverse Osmosis Plant." *Proceedings of Conference, Membrane Technology*. pp. 729-754, 1993.
12. Tare. M M., Gada. M.K., Siddiqui. M.A. and Mehta . M.H., "Economics of Desalination In Water Resource Management — A Comparison of Alternative Water Resources for Arid/Semi Arid Zone In Developing Countries." *Jour. Desalination*. Vol. 81, pp. 57-75, 1991.
13. Tewari. P. K., Hanra. M. S. and Ramani. M. P. S. (1987) "Relative Technoeconomics of Multistage Flash Distillation and Reverse Osmosis for Seawater Desalination - A case study." *Jour. Desalination*. Vol 64, pp. 203-210.
14. Wade. M.M., "The Effect of The Recent Energy Cost Increase on The Relative Water Costs from RO and Distillation Plant." *Jour. Desalination*. Vol. 81, pp. 3-18, 1991.
15. Wade. N.M., "R. O. Design Optimization." *Jour. Desalination*. Vol. 64, pp. 3-16. 1987.
16. Wade. N.M., "Technical and economic evaluation of distillation and reverse osmosis desalination processes." *Jour. Desalination*. Vol. 93, pp. 343-363, 1993.