

지속성 비료의 개발

文 相 翕 · 徐 成 璧*

한국과학기술연구소

Controlled Release Fertilizer

Sang Heup Moon and Sung Sup Suh*

Korea Institute of Science and Technology

요 약

비료의 낭비를 방지하고 작물에 대한 효능을 향상시키기 위하여 개발된 지속성비료에 대하여 그 필요성과 제조방법 등을 설명하고 실제로 상업화가 이루어진 Ureaform, MagAmP, SCU 등의 제품을 소개하였으며 이들의 경제성을 검토하였다. 또한 앞으로의 연구과제를 설명함으로써 이 분야에서의 연구방향을 제시하였다.

ABSTRACT

Controlled-release fertilizers are developed to prevent wasteful use of fertilizers as well as to supply proper amounts of fertilizer ingredients to crops. In this paper, necessity and techniques of controlled-release fertilizers are discussed, a few commercial products are introduced, and their economic aspects are considered. Several areas of future investigations are also indicated.

1. 지속성비료의 필요성

Wöhler의 요소합성 이래에 계속하여 발전된 대규모의 비료화학공업에 힘입어 세계의 농작물

생산은 크게 증가되었다. 우리나라도 1961년에는 총주비료의 요소 생산능력 85000톤 뿐이던 것이 1980년에는 요소, 유안, 인산, 복비 등을 합하여 총생산능력이 290여만 톤에 이르게 되었으며 이에 따라 농작물의 생산량도 점차 증가

* 표면화학연구실

* *Surface Chemistry Laboratory*

되었다. 특히 한국식량의 대중을 이루는 수도작의 경우에는 그간 품종개량, 농약 및 비료의 보급, 영농의 기계화, 관개시설의 증대 등에 힘입어 인접한 아시아국가들에 비하여 단위면적당 수확량이 가장 높은 기록을 보이고 있다. (한국: 678 kg/10 a, 일본: 616 kg/10 a, 인도네시아: 276.3 kg/10 a, 필리핀: 195.9 kg/10 a).¹⁾ 그러나 이러한 식량증산에도 불구하고 과거 10년간 (1969~1978) 한국의 총인구는 17.4%가 증가한 데 비하여 동기간 식량생산의 증가는 14.5%로서²⁾ 아직도 식량생산이 인구증가를 따르지 못하고 있는 실정이다. 더구나 점차 증대할 산업발전에 따른 경작지의 감소, 영농인구의 유출, 농약의 과잉사용에 따른 공해문제, 관개시설의 한계성등을 고려할 때에 앞으로도 식량의 결핍현상은 계속될 것이며 상당량의 곡물도입이 불가피할 것으로 예상된다.

한편 에너지가격의 상승에 따라 비료의 가격도 점차 높아져서 1969~1978년 사이에 5배 이상의 상승을 보였다.³⁾ 최근에 들어 이러한 비료를 과잉 작물재배에 효율적으로 사용하고 있는 것인가 하는데에 많은 의문이 제기되었으며 실제의 연구결과에 의하면 상당량이 비효율적으로 낭비되고 있는 것으로 나타났다. 즉 Allison⁴⁾에 의하면 질소비료의 경우 시비량의 50~60%만이 작물에 의하여 흡수되며, 인산과 칼리비료는 5~25%, 40~70%가 각각 흡수되는 것으로 나타났다. 이와같이 시비된 비료의 상당량이 유실되는 현상은 특히 다량의 물을 사용하는 수도작이나 다우(多雨)지방에서 심각하여, 또 다른 실험에⁵⁾를 보면 40 인치의 급수조건에서 옥수수 재배에 요소를 사용했을 경우 시비량의 6%만이 흡수되는 것으로 나타났다. 비료유실의 주 원인은 시비된 비료가 수일내에 물에 완전히 용해되고 용해된 비료는 작물에 의하여 흡수되기 전에 다시 분해, 증발되거나(요소의 경우 Ammonia Volatilization) 또는 토양의 심층으로 배수되며(Leaching) 더구나 수도작의 경우에 비가 오면 논에서 넘쳐 흘러 하천이나 바다로 유실되기 때문이다. 다시 말하면 시비된 비료가 물에 너무 빨리 용해되기 때문에 작물에 의한 흡수 이전에

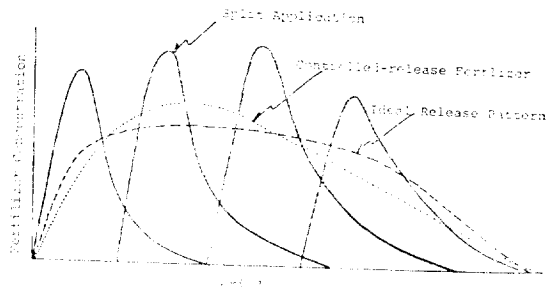


Fig. 1. A Schematic Diagram to represent Necessity of Controlled-release Fertilizer

유실되고 마는 것이다. 이와같은 비료의 유실은 비료가 물에 용해되는 속도를 조절함으로써 방지, 또는 감소시킬 수가 있다.

비료의 유실 이외에도 재래식 비료는 시비 직후에는 작물이 필요로 하는 양보다도 지나치게 많은 비료농도를 토양에 공급하게 되고 시간의 경과에 따라 농도가 급격히 감소하여 상당한 기간중에는 작물의 필요농도를 공급하지 못하게 되며 이러한 비료의 과잉 및 결핍현상(Fig. 1 참조)은 결국 작물의 성장과 수확량에 영향을 미치게 된다. 실제로 수도작에 대하여 재래식 요소비료를 4~5회 분할시비하는 경우와 같은 양의 지속성 비료를 일회시비하는 경우의 비교실험결과를 보면 지속성비료(SCU)를 사용하는 경우에 벼의 수확량이 10%이상 증수되는 것으로 나타났다.⁶⁾ 이와같이 지속성 비료는 비료성분의 효율적인 공급으로 인하여 작물수확량의 증가를 준다는 잇점 외에도 재래비료의 4~5회 분할시비에 비하여 일회시비로도 충분하기 때문에 비료의 시비에 필요한 노동력을 절감할 수 있다는 잇점이 있다. 참고로 우리나라의 수도생산비 중 노동력 경비는 50% 이상을 차지한다.⁷⁾ 또한 비료의 유실로 인한 하천등의 오염방지, 배수가 심한 사질(砂質) 토양이나 급경사지의 시비, 빈번한 시비가 불가능한 산림용 및 간척지용의 비료로서 지속성비료는 그 용도가 크다고 보겠다.

2. 지속성비료의 제조방법

재래식비료의 비효율성은 주로 시비된 비료가

물에 급격히 용해되는데에 기인하며 따라서 지속성비료의 제조 방법은 비료의 물에 대한 용해속도를 조절함으로써 작물이 필요로 하는 양을 적시에 공급하도록 하는 것이다. 이와같은 조절방출법(Controlled-Release Technology)는 비료 이외에도 의약, 농약, 향료, 염료, 효소등의 정밀화학제품에 대하여 최근에 널리 응용되고 있는 기술로서 많은 종설문헌들⁷⁾이 있다. 비료의 경우에는 N, P, K의 세가지 주요성분중 주로 N성분에 대한 조절방출이 많이 연구되고 있는데 이것은 P, K 등은 적절한 시기에 집중적으로 작물에 공급하여야 하는 성분인데에 반하여 N은 작물의 성장기간중 계속적으로 공급하여야 하기 때문이다. 특히 비료가 의약이나 효소등에 비하여 가격이 저렴한 제품이기 때문에 비교적 낮은 가격으로 지속성비료를 제조하는 문제가 중요하다. 지속성비료의 제조방법은 크게 화학적인 방법과 물리적인 방법으로 나눌 수가 있는데, 전자는 비료를 타물질과 화학적으로 결합시킨 후 이것이 물속에서 서서히 용해 또는 분해되면서 비료성분을 방출토록 하는 방법으로 여기서 화학결합의 강도, 용해도, 분해속도 등이 문제가 되며, 후자는 비료를 적당한 물질로 피복 또는 흡착시키어서 물속에서 비료가 피막을 통하여 방출되거나 흡착물질로부터 서서히 탈착되도록 하는 것으로 피막을 통한 비료성분의 확산속도, 탈착속도 등이 문제가 된다. 우선 지속성비료의 몇가지 형태를 소개하고 보다 구체적인 제품내용은 다음 장에서 언급하기로 한다.

2-1. 화학적 방법

1) 유기질과의 결합

요소의 2량체(Diuret)와 3량체(Triuret) 또는 요소와 적절한 유기물질과의 축합물질은 물에 낮은 용해도를 가지며 토양중의 미생물이나 화학반응(Depolymerization, Hydrolysis 등)에 의하여 점차 분해됨으로서 요소를 방출하게 된다. 특히 요소와 알데히드(Aldehyde)와의 축합물질은 사용하는 알데히드의 종류에 따라 다양한 용해도를 갖도록 할 수 있는 잇점이 있어서 지속성비료로서 많이 연구되고 있는 제품이며

Ureaform(UF), Crotonylidenediurea(CDU), Isobutylidenediurea(IBDU) 등이 여기에 속한다. 알데히드 이외에도 시안산(Hydrogen Cyanide), 시안산칼슘(Calcium Cyanide), 칼슘카바이드(Calcium Carbide), 암모니아, Glyoxal 등과의 축합물질들이 있다.

2) 무기질과의 결합

일반적으로 $\text{MNH}_4\text{PO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 나 $\text{MKPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (여기서 M은 Cu, Co, Fe, Mg, Mn, Zn 등의 2가 금속)로 표시되는 인산염은 물속에서 낮은 용해도(0.01% 이하)를 가지며 용해된 성분은 직접 작물에 흡수되어 비료의 역할을 한다. 이 중에서 마그네슘의 인산염은 가장 많은 연구가 진행된 지속성비료로서 미국의 Grace Co.에 의하여 잔디용비료로 개발되었다.⁸⁾ 그러나 이 형태의 비료는 제조공정이 까다롭고 비료성분의 함량이 적으며 용출속도의 다양한 조절이 곤란하다는 점등으로 인하여 크게 실용화가 되지 않은 상태이다. 또 비교적 단기간에 공급이 요구되는 P성분을 지속성으로 해야할 필요가 있는 가에도 문제가 있다고 보겠다. 한편 마그네슘 인산염을 사용하여 요소를 피복함으로써 지속성 소함비료를 제조하는 방법도 제시되었다.⁹⁾

2-2. 물리적 방법

1) 피복에 의한 방법

비료의 피복방법으로 가장 간단한 것은 비료를 폴리에틸렌등의 작은 포대에 담고 밀봉을 한 후 포대에 몇개의 구멍을 내 놓음으로써 포대안에서 용해된 비료가 구멍을 통하여 서서히 방출되도록 하는 방법이다.¹⁰⁾ 그러나 이 방법은 방출되는 비료가 토양중에 균일하게 분산되지 못하고 국지적인 농도분포를 보이는 결점을 갖는다. 따라서 각각의 비료입자를 적당한 물질로 피복시키는 방법이 연구되어 왔다. 우선 피복물질로는 가격이 저렴하고 피막성질이 좋으며 토양이나 작물에 무해한 것을 선정하는 것이 중요하다. 또한 피복하고자 하는 비료입자(특히 요소)는 표면이 불균일하기 때문에 이러한 조건에서도 적은 양으로 피복이 잘되는 것이어야 한다. 지금까지 제안된 피복물질로는 유황, 왁스,

각종 고분자물질등이 있으며 피복방법으로도 직접 분무에 의한 물리적 방법과 표면반응(Surface Polymerization 등)에 의한 화학적 방법의 두가지가 있다.

2) 흡착 및 혼합에 의한 방법

비료를 Zeolite, Vermiculite, Perlite 와 같이 값싸고 다공성인 무기질에 흡착시키거나^{11, 12, 13)} 펄프, 옥수수축 등의 세루로즈에 함침시키는 방법¹⁴⁾도 시도되었다. 또 왁스나 아스팔트등의 물에 안 녹는 물질에 비료를 혼합시킴으로써 비료 성분이 혼합매체내에서의 확산에 의하여 서서히 방출되도록 하는 방법도 있다.¹⁵⁾ 이들 방법은 폐기물 또는 값싼 물질들을 이용할 수가 있어서 제품의 가격이 낮은 반면 제품중 비료의 함량이 적고 방출속도의 정확한 조절이 힘들며 비료사용 후에 불필요한 물질이 토양에 누적된다는 문제들이 있다. 지역 또는 토양조건에 따라 소규모의 활용은 가능하겠으나 대규모의 상업화는 힘들 것으로 전망된다.

3. 지속성비료의 개발

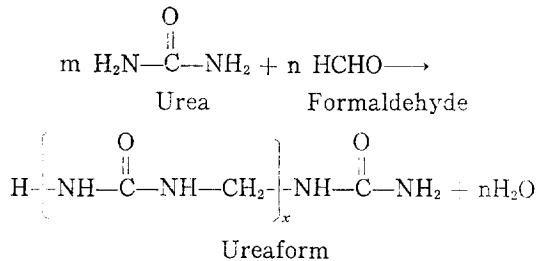
앞에서 설명한 방법들에 의하여 지금까지 여러가지의 지속성비료가 제조되었으며 이들은 이미 각종의 문헌에 상세히 소개되어 있다.^{16, 17, 18)} 여기서는 이들 지속성 비료중에서 비교적 제조 공정 및 작물시험에 관한 연구가 많이 진행되어 상업화단계에까지 이른 제품 몇가지만을 선정하여 소개하고자 한다.

3-1. Ureaform(UF)

요소와 알데히드의 축합고분자는 1930 년대에 열경화성수지로 처음 개발되었으며 1940 년대 후반에는 중합도를 조절하여 얻어지는 저분자량물질이 지속성비료로 유용함이 밝혀졌다.¹⁹⁾ 이 축합반응은 산 또는 알칼리 촉매하에서 쉽게 진행되며 중합도, 요소/알데히드의 비배고분자의 가교도(Cross-linking) 등을 변화함에 따라 생성물의 물에 대한 용해도를 조절할 수가 있다.

특히 Ureaform은 아래에 표시된 바와 같이 Urea 와 Formaldehyde 의 축합물로서 반응이 비

교적 빠르고 질소의 함량이 높아서(38%N) 지속성비료로 유리하다.



이 반응은 사용하는 Urea/Formaldehyde 의 비, 반응용액의 PH, 온도, 반응시간, 촉매등에 따라서 제품의 질소함량, 물에의 용해도 등이 변화하기 때문에 반응시키는 물론 저장 및 사용시의 조건을 정확히 조절해 주는 것이 중요하다. Ureaform 을 제조하는 공정은 낮은 농도의 반응용액을 사용하는 경우(Dilute Solution Process)와 높은 농도를 사용하는 경우(Concentrated Solution Process)의 두가지가 있다.¹³⁾ 낮은 농도의 방법은 산촉매를 사용하여 비교적 낮은 온도에서(30°C) 반응을 진행시키고 미반응물은 다시 반응기에 회수한 후 반응용액을 알칼리로 중화정여과하며 생성된 Ureaform 은 입상화(Granulation), 건조등의 공정을 거친다. 이 방법은 공정의 제어가 용이하고 제품의 품질이 균일한 반면에 미반응물의 회수와 여과 및 건조등에 따른 공정비용이 높다는 단점이 있다. 한편 높은 농도를 사용하는 방법은 농축된 반응용액을 알칼리성으로 만든 후 서서히 가열하면서 산을 첨가하고 다시 이 용액을 고온으로 유지된(80~100°C) 벨트나 회전판 위에 부어서 급격히 반응시키는 방법이다. 생성된 Ureaform 은 알칼리로 중화된 후 건조된다. 여기서의 잇점은 반응시간이 짧고 공정이 간단하며 건조비용이 적다는 것이지만 반대로 제품의 품질이 균일하지 못한 단점이 있다.

Ureaform 은 백색, 무취의 고체로서 토양중의 분해에 의하여 요소를 방출하게 되며 단독비료로 사용하거나 또는 다른 복합비료와의 혼합, 액체비료에 분산, 다공성 무기질에 함침하여 사용할 수 있다. 복합비료와 혼합사용되는 경우에

는 혼합시의 PH(5~6), 온도(200°F 이하), 혼합시간등을 주의깊게 조절하여서 Ureaform 이 더 이상 중합되는 것을 방지해야 하며 저장시에도 온도를 100°F 이하로 유지하여야 한다. Ureaform의 제조시에 PH 조절제로는 통상 황산이 사용되지만 대신 인산을 사용함으로써 제품이 복합비료의 효과를 갖게 하는 경우와 또 용출속도의 조절을 위하여 발포성(Foamed) 제품을 제조한 예도 있다. Ureaform은 일반작물보다는 잔디용, 화분용 및 특수작물용 등으로 사용되고 있는데 상업화된 제품으로는 미국의 Du Pont사에 의하여 개발된 유안과의 혼합물인 "Uramite", 암모니아수와의 혼합물인 "Uramon" 등이 있다. 미국은 1972년에 Du Pont, Hercules Powder, Borden Chemical 등에 의하여 년산 약 50,000톤의 Ureaform을 생산한 것으로 알려졌다.²⁰⁾ 일본의 경우 1976년의 생산량은 년산 약 3,000톤 정도이다.²¹⁾

Ureaform 이외에도 다른 알데히드와의 축합물이 다양하게 제조되었는데 이중 대표적인 것은 Acetaldehyde와의 반응물인 "Urea-Z",²²⁾ Crotonaldehyde와 반응한 "CDU",²³⁾ Isobutyraldehyde와의 "IBDU"²⁴⁾ 등으로 특히 일본에서 상업화가 많이 이루어져 1976년의 연간 생산량은 CDU 7,000여톤, IBDU 20,000톤에 이르고 있다.²⁵⁾ 이들은 모두 Ureaform과 유사한

성질을 갖지만 Ureaform에 비하여 질소의 함량이 적은 결점을 갖는다. 한편 알데히드 이외에도 각종 유기물과 요소의 축합반응에 의한 지속성비료가 있는데 이중의 일부를 소개하면 Table 1에서와 같다.

3-2. Magnesium Ammonium Phosphate (MagAmP)

앞에서 언급한 2가금속의 인산염은 이미 1857년에 지속성 비료로서의 효용성이 지적되었고³⁰⁾ 그후로도 많은 연구가 진행되어^{31,32)} 최근에는 미국의 Grace Co.에 의하여 생산되는 Magnesium Ammonium Phosphate(이하 MAP라 부름)가 "MagAmP"라는 상품명으로 시판되고 있다. MAP는 제조공정의 온도에 따라 57°C 이상에서는 1수화물, 57°C 이하에서는 6수화물로 각각 존재하는데 지속성비료로 통상 사용되는 것은 1수화물로서 상온에서 0.014 g/100 ml의 용해도를 가진다. 이것은 P_2O_5 의 함량이 45%, N이 9%이고 또한 25% 존재하는 MgO가 작물에 필요한 성분이므로 비료로서 유리하다고 보겠다.

MAP는 크게 두가지의 방법에 의하여 제조할 수가 있는데 첫째로 MgO, $Mg(OH)_2$, $MgCO_3$ 등의 마그네슘화합물과 암모니아, 인산 등을 직접 반응시키는 방법과 둘째로 $MgCl_2$ 와 암모니아, 인산, 물 등을 사용하여 침전반응시키는 방법으

Table 1. Controlled-Release Fertilizers by Chemical Modification

Name	Raw Materials	N Content (wt %)	Melting pt. (°C)	Water Solubility (gr/100 ml)	Ref.
Ureaform	Urea, Formaldehyde	23-41	111-230	sol.-insol.	17
CDU	Urea, Croton-aldehyde	35	260	0.06	17
IBDU	Urea, Isobutyr-aldehyde	32	205	0.1-0.01	17
Triazine	Urea, Ammonia	32-67	360	0.008-0.27	21
Oxamide	Urea, Hydrogen-Cyanide	32	417	0.04	26
Guanyl-urea	Urea, Calcium-cyanamide	55	105	—	27
Dicyan-diamide	Urea, Calcium-carbide	67	210	2.3	28
Glycol-uril	Urea, Glyoxal	39.4	300	—	29

로 두번째 방법은 NH_4Cl 이 부산물로 생성되기 때문에 이의 처리가 문제가 된다. 그러나 해수나 Brine Water를 사용하는 공정에서 Scaling의 방지를 목적으로 MgCl_2 를 제거하는 경우라면 여기서의 부산물인 MgCl_2 를 사용하여 MAP를 제조할 수 있기 때문에 경제성이 맞을 수가 있다. 상업적으로 널리 쓰이는 공정은 첫째의 방법인데³³⁾ 반응당량비의 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 인산과 10% 과량의 암모니아가 동시에 반응기점 입상제조기로 혼입되고 여기서 생성된 MAP는 건조, 냉각, 입자선별 등의 공정을 거친다. 최종 MAP의 입자크기는 제품의 용출속도(이것은 MAP의 용해도 보다도 토양중 미생물에 의한 MAP의 분해에 의하여 결정된다는 연구결과³²⁾가 있음)에 영향을 미치기 때문에 너무 크거나 작은 입자는 다시 반응기로 회수된다. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 는 46%의 slurry 형태로 반응기에 주입되고 인산은 50~55%의 P_2O_5 를 함유하는 Furnace-Grade를 사용하는 것이 보통이다. 이러한 직접반응법 이외에도 암모니아와 인산을 먼저 반응시키고 생성된 $\text{H}_2\text{NH}_4\text{PO}_4$ 를 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 와 반응시키거나, 또는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 와 인산을 먼저 반응시킨 후 암모니아와 반응시킴으로써 공정의 제어를 향상시키는 방법도 제시되었다. 한편 Rock Phosphate와 황산을 반응시키고 여기에 암모니아수, MgSO_4 를 가한 후 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 존재하에서 가열반응시키는 방법과 Dolomite와 Calcium Phosphate의 반응물을 Ammoniation 시키는 방법도 있다.

MAP를 각종 작물의 재배에 사용하였을 때 그 효율성을 재배식비로, Ureaform의 경우와 비교한 결과를 보면 MAP는 특히 원예작물, 화분재배, 유실수, 산림용의 사용에서 Ureaform보다도 우수한 것으로 나타났다. 이것은 MAP가 지속성효과 외에도 N, P, Mg 등의 유효성분을 모두 공급하기 때문인 것으로 추정된다. MAP는 단독(8-40-0)으로 사용되기도 하지만 이와 유사한 지속성효과를 갖는 Magnesium Potassium Phosphate(줄여서 MPP)와 혼합사용하여 복합비료(70-40-6)의 효과를 기하는 경우도 있다. 다그네슘 이외에도 Cu, Co, Fe, Mn, Zn 등의 인산염도 지속성비료로서 유용하며 특히 작

물의 필요성분인 이들 미량금속을 공급할 수가 있어서 여러가지의 혼합으로 사용되고 있다.

3-3. Sulfur Coated Urea(SCU)

이 제품은 주로 미국의 TVA에 의하여 개발되었는데³⁴⁾ 피복물질로서 유황을 선정한 주 이유는 유황이 석유의 탈황공정에서 다량으로 값싸게 얻어진다는 점과 고온에서 고무상유황으로 되어 피복성질이 좋아진다는 점, 토양에 따라 유황성분의 결핍을 갖는 경우가 있다는 점 등이다. SCU의 개발초기에는 유황을 용매에 녹여서 입상요소에 분무피복하는 방법이 시도되었으나 용매회수 등의 문제가 있어서 최근에는 고온(154°C 이상)에서 얻어지는 액상의 Molten Sulfur를 직접 요소표면에 분무시키는 방법이 개발되었다.³⁵⁾

SCU를 제조하는 공정은 다음과 같다. 먼저 입상의 요소를(입자 크기 : $0.1 \sim 1.0 \text{ g}$) $65 \sim 75^\circ\text{C}$ 로 예열시킨 다음 여기에 154°C 의 Molten Sulfur를 분무피복시킨다. 이 피복공정은 회전로(Rotary Drum) 내에서 행하여 지는데 이때의 회전속도, 유황분무속도, 분무시간과 피복후와 냉각속도 등에 따라 유황피막의 성질이 결정된다. 그러나 이와같이 유황으로만 피복된 제품의 표면은 작은 균열(Crack)과 구멍(Pinhole) 등이 있어서 물속에서 용해된 요소가 이 균열과 구멍등으로 새어 나오기 때문에 용출속도를 조절하기가 힘들다. 따라서 유황피복 후 제품이 냉각되기 전에 소량의 밀봉제(Sealant)를 추가로 분무하여 이들 균열 및 작은 구멍을 밀봉시켜야 한다. 지금까지 밀봉제로는 Microcrystalline Wax, 저분자량의 Polyethylene 및 그 공중합물, Brightstock Oil, Rice Bran Wax 등 각종의 물질이 사용되었다. 유황과 밀봉제의 피복이 끝난 제품은 냉각(43°C)된 후 여기에 다시 분말의 구조토를 입히어 제품의 저장성, 침수성(Sinking in Water) 등을 좋게 한다. 통상 사용되는 피복물질의 양은 유황 15~25%, 밀봉제 2%, 구조토 2.5~3%이다. 여기서 유황의 피복량은 사용하는 요소입자의 크기 및 표면상태에 따라 변화하는데 즉 입상화(Granulation)의 차

리공정을 거쳐서 모양이 거의 구형(球型)이고 표면이 매끄러운 입상요소(Granular Urea)의 경우(입자크기는 0.1 g 정도)에는 15~20%의 유효함으로도 충분한데 비하여 이러한 공정을 거치지 않은 Prilled Urea는 입자의 모양이 불균일하고 표면이 거칠어서 20~25%의 유효함을 필요로 한다. SCU의 개발에서 가장 문제가 되는 것은 밀봉제의 선정이다. 값싼 유효함을 피복물질로 사용하고자 한 애초의 의도에 반하여 제품표면의 균열등을 밀봉시키기 위한 밀봉제(유효가격의 약 10 배)를 사용하게 됨에 따라 제품의 단가가 높아지는 것은 물론 이들 밀봉제가 온도에 민감하고 또 토양중의 박테리아등에 의하여 쉽게 분해되기 때문에 이러한 문제가 없는 값싼 밀봉제를 찾는 것이 아직도 해결되지 않은 연구과제이다. 최근에 박테리아에 의한 밀봉제의 분해를 막기 위하여 소량의 항 박테리아제를 첨가하는 방법이 제안되었지만 어디까지나 지엽적인 해결책이라고 보겠다.

SCU는 특히 수도작과 같이 주기적인 급수(給水), 배수(排水)를 거치는 작물에 대하여 그 효과가 우수한 것으로 밝혀졌다.³⁶⁾ 우리나라의 농촌진흥청에서 행한 수도작에 대한 SCU의 실험결과(Table 2)를 보면 시비지역에 따라 약간의

Table 2. Comparison of SCU and Urea for Paddy Rice*

수확량 (kg/10 a)	비종 비중	통 일		일 반	
		Urea	SCU	Urea	SCU
농업기술연구소				495	591
충 북		688	722		
충 북		654	698		
충 남		530	569		
전 북		506	518	294	312
전 남		432	503		
전 남		399	426		
경 북		446	563	417	513
경 남		512	549	363	354
평 균 수 량		528	580	392	443
수 량 지 수		100	109.8	100	113.0

* 자료: 농촌진흥청 1973년 실험결과

차이가 있지만 재래식요소의 분할시비에 비하여 비의 수확량이 평균 10~13%가 증가됨을 알 수가 있다. SCU는 밀봉제의 추가피복으로 인한 가격상승문제가 있지만 그래도 현재까지 알려진 지속성비료 중에서는 가장 값이 싸고 그 효능도 우수한 것으로 알려져서 특수작물용 외에도 일반작물을 위한 범용비료로서의 사용가능성이 크다고 보겠다. SCU는 현재 TVA에서 년산 66,000톤 규모의 시험공장을 건설하고³⁴⁾ 대규모의 상업화를 추진중이며 영국의 ICI(Imperial Chemical Industries)는 년산 10,000톤 규모의 시설로 "Gold-N"이라는 제품을, 일본의 미쓰이도아즈(三井東圧)는 "피복화성 1호"라는 제품(생산규모 미상)을 각각 판매 중이다. 이외에도 캐나다의 Canadian Industries Ltd.에서 년산 30,000톤 규모의 SCU 공장을 1975년에 건설하였다.

피복물질로 유효대신 각종의 고분자물질을 사용하는 방법도 많이 연구되었지만³⁷⁾ 대개가 경제성 때문에 연구발표나 특허단체에서 그치고 크게 상업화가 되지 않은 실정이다. 몇가지 특수작물을 위한 상업화의 예로는 미국의 Archer Daniels Midland Co.(후에 Sierra Chemical Co.에 특허권 양도)에 의하여 개발된 "Osmocote"³⁸⁾와 역시 미국의 3M Co.에 의하여 개발된 "Precise"³⁹⁾로서 전자는 Dicyclopentadiene과 각종 Glycerol Ester의 공중합물을 사용한 다층피복(Multi-layer Coating) 제품이며 후자는 N, P, K성분을 함유한 액체비료(12-6-6)를 역시 유사한 고분자물질로 피복시킨 것이다. 모두가 제품가격 때문에 가정용으로 소량씩 사용되고 있다.

4. 경제성 검토

지속성비료의 경제성은 두가지 측면에서 고려되어야 한다. 즉, 첫째는 재래식비료와 비교한 지속성비료의 제조단가 검토이며 둘째는 이들 지속성비료를 사용하였을 때 작물의 성장 및 수확량증가로 인한 투자액 회수율의 검토이다.

4-1. 제조가격

지속성비료는 재래식비료에 비하여 추가의 제조공정, 반응물질, 피복물질 등을 사용하기 때문에 그 생산비가 일반적으로 비싼 편인데 특히 화학적 지속성비료의 경우는 물리적인 제품에 비하여 2~3배의 높은 단가를 보이고 있다. 참고로 1974년 말의 가격을 보면³⁵⁾ Ureaform은 \$375/톤, \$950/N톤인데 비하여 SCU는 \$168/톤, \$524/N톤이었다. 한편 요소의 가격은 \$170/톤, \$370/N톤으로 N성분기준으로 하였을 때에 Urea: SCU: Ureaform의 가격비는 1:1.4:2.6을 보인다. Ureaform 이외의 CDU, IBDU, MagAmP 등도 유사한 가격을 가지며 따라서 화학적 지속성비료보다는 물리적 제품이 제조가격면에서 유리함을 알 수가 있다. SCU에 대하여는 TVA 연구진에 의한 제조가격의 산출 결과가 있는데⁴⁰⁾ 이것은 Table 3에 표시된 바와 같다. 여기서 보면 제조가격의 대부분이 요소를 위시한 피복물질에 의하여 결정되며 시설 및 운전비용은 10% 이하임을 알 수가 있다. 특

Table 3. Production Cost of SCU(32-0-0-26S)*

Plant investment, \$ million	3.09
Working capital, \$ million	0.80
Total investment, \$ million	3.89
\$/MT product	

Production Costs

Raw Materials

Sulfur at \$48/MT	12.50
Sealant Mix at \$375/MT	7.50
Conditioner at \$75/MT	1.90
Urea at \$170/MT	118.15
Subtotal	140.05
Operating Costs	9.45
Capital Charges	6.50
Production Cost, \$/MT product	156.00
Return on Investment, 20% pretax	11.80
In-plant Price	
\$/MT of product	167.80
\$/MT of N	524.00

* Year: 1978, Ref. 40

히 유통 이외에도 밀봉제를 사용함으로 인한 가격상승은 현저하다. 이와같이 피복물질이 제품총량의 약 30%를 차지하게 됨에 따라 최종제품 중의 N의 함량은 31% 밖에 안되며(요소의 경우 46% N) 이것은 N기준당의 제품가격을 높이는 결과가 된다.

4-2. 투자회수율

지속성비료는 재래식 비료에 비하여 비싸지만 이것을 작물재배에 사용하였을 경우 작물의 성장 및 수확량증가로 인한 이익을 감안하면 현저한 경제성을 갖게 된다. 앞서도 언급한 바와 같이 SCU를 수도작에 사용하였을 경우 쌀의 수확량은 10~13%의 증가를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 SCU와 쌀의 가격차이를 고려할

Table 4. Economics of SCU Production*

사업내용	기간 (년)	투자액(억원)	이익(억원)	B/C Ratio
연구개발	4	-5.98		
공장건설	2	-12.54		
공장가동	10			
수확량증대				
0.5%		-6.75	6.76	0.77
1.0%		-6.75	13.52	1.53
3.0%		-6.75	40.56	4.60
6.0%		-6.75	81.11	8.36

* 생산규모: 50만톤 SCU/년

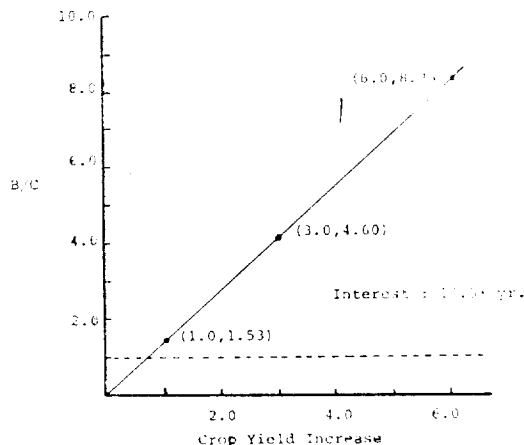


Fig. 2. B/C Ratio for SCU Production

때에 높은 경제성을 뒷받침한다고 보겠다. 참고로 국내에 50 만톤 규모의 SCU 공장을 건설하고 이를 사용하는 경우 쌀의 수확량증가에 따른 투자회수율의 산출결과⁴¹⁾를 보면 Table 4 및 Fig. 2에서와 같다. 이 결과에 의하면 쌀의 수확량이 1%증산인 경우 B/C Ratio는 이미 1.0을 넘는 1.53에 달하며 3%, 6%의 증산(실제 증산율은 10% 이상)에 따라 B/C Ratio는 각각 4.6, 9.2가 되어 투자에 대한 회수율이 지극히 높다는 것을 알 수가 있다.

한편 이상의 투자회수율 검토는 지속성비료의 사용에 따른 몇가지 잇점 및 문제점 등을 고려하지 않은 것이다. 즉, 시비노동력의 절감, 제품의 다양한 변화에 의한 토양 및 작물에의 미량원소공급, 비료의 과다사용방지 등이 부수적인 잇점으로 고려되어야 하며 반면에 피복물질(특히 유헴)에 의한 토양변화, 제품의 저장성, 그리고 제품의 무게증가로 인한 비료수송비의 부담등이 문제점으로 지적되어야 한다.

5. 연구과제

지금까지 알아본 지속성비료의 개발에 있어서의 문제점들을 몇가지 정리하고 이에 따른 앞으로의 연구방향을 제시하면 다음과 같다.

5-1. 피복물질의 선정

앞서 언급한 바와 같이 특수작물이나 원예 등의 특수용도를 제외하고는 지속성비료의 가격이 재래식비료의 약 40%이상(N기준)이 되어서는 실제의 사용자에게 범용비료로서의 설득력이 적다고 보겠다. 따라서 지속성비료의 방법으로는 화학적인 방법보다는 값이 비교적 싸고 또한 기존의 비료를 그대로 이용할수 있는 물리적인 방법이 유리하다. 특히 피복에 의한 방법은 공정이 비교적 간단하고 용출속도의 조절이 쉬우며 비료성분의 함량을 높게 유지할 수가 있어서 좋은데 여기서 피복물질로서 값이 저렴하고 피복성질이 우수하며 토양에 해가 없는 물질을 선정하는 것이 중요하다. 지금까지, 피복물질 중에는 유헴이 비교적 좋으나 이것도 균열 등으로

인한 밀봉제의 추가사용 때문에 아직도 만족할 만한 것이라고 보기에는 부족한 실정이다. 특히 우리나라와 같이 유헴을 수입해야 하는 경우에는 제조가격의 추가상승을 초래하며 또한 유헴으로 인한 토양의 산성화는 장래에 심각한 문제를 야기할 가능성이 있다고 본다. 한편 피복물질이 용출속도의 조절뿐만이 아니라 토양중에서 점차 분해되어 토양 및 작물이 필요로 하는 유효성분을 공급할 수 있다면 가장 바람직 할 것이다. 이에 대하여는 현재 국내의 한국과학기술연구소와 미국의 IFDC(International Fertilizer Development Center)에 의하여 연구가 진행중이다.⁴²⁾

5-2. 작물에 필요한 비료의 용출속도

지속성비료의 개발에서 항상 문제가 되는 것은 과연 작물이 필요로 하는 최적의 비료용출속도가 무엇인가 하는 문제이다. 지금까지는 대개의 경우 과다(過多) 또는 과소(過少)의 시비를 하였을 때에 작물에 미치는 영향만이 연구되어 왔을 뿐 어떠한 용출속도의 비료공급이 가장 최대의 성장 및 수확량을 초래하는가에 대하여는 아직 연구가 미진한 상태이다. 이 문제는 사용하는 비료의 성분, 작물의 종류, 토양의 상태, 기후 및 급수조건 등을 모두 고려해야 할 과제이므로 광범위한 연구진의 참여가 요구되지만 특히 우리나라의 경우 특정한 조건(예를들어 요소, 수도작, 한국토양, 한국기후 등)에 따른 연구를 집중적으로 추진할필요가 있다고 본다. 지금까지의 연구결과에 의하면 수도작의 경우 모내기 후 2~4주 기간에는 벼가 작기 때문에 요소의 필요량이 비교적 적고(총소요량의 10% 이하) 그후 2~3개월간에는 벼의 성장에 따라 다량의 비료공급이 요구되며 수확기에 이르러는 거의 필요로 하지 않는 것으로 알려졌다. 이와 같은 벼의 요소필요량을 만족시키기 위한 지속성비료의 용출형태는 용출량-시간의 도표에서 "S"형으로 보이기 때문에 통상 "S-형 용출특성"이라고 불리운다. 참고로 SCU의 용출속도는 초기에는 비교적 빠르고 시간이 지남에 따라 느려지기 때문에 이러한 "S-형 용출특성"을 갖

지 않는다. 수도작을 위하여 “S—형 용출특성”을 갖는 지속성비료가 개발되어야 할 것이다.

5-3. 품질관리

지속성비료는 용출속도가 느리기 때문에 다량의 제품을 생산하는 경우 그 품질을 빨리 판별해야 하는 문제가 생긴다. 지금까지 고안된 방법으로는 제품을 40°C의 물속에 넣고 교반하지 않은 상태로 7일간 방치한 후 그 용출량을 측정함으로써 실제로 토양중에서의 용출속도를 추정하는 방법이 있다.⁴³⁾ 그러나 지속성비료는 온도(특히 고분자 피복제품은 온도증가에 따라 용출속도가 급격히 증가), 교반(무기질 피복물질의 교반에 의한 파손), PH, 토양중의 미생물(SCU에서의 밀봉제) 등에 의하여 그 용출속도가 민감하게 변화하므로 이에 대한 보다 깊은 연구가 필요하다. 또한 고분자나 왁스 등을 사용한 피복형 지속성비료의 경우에 오랫동안 저장함에 따라 압력, 온도, 습도 등에 의하여 변질되거나 들러붙는 예가 있으며 시비하였을 때에 물에 가라앉지 않고 뜨는 예도 있어 이들에 대한 고려도 이루어져야 한다. 대량생산을 하는 경우에 균일한 품질의 제조문제(SCU의 경우에 심각함)도 공정기술에 첨가되어야 한다.

5-4. 비료정책

지속성비료는 지금까지 많은 연구가 진행되었으나 아직도 범용비료로서 대량 사용할 수 있는 제품은 개발되지 않았다. 그러나 앞으로의 연구에 의하여 우수한 지속성비료가 개발될 가능성은 높다고 본다. 여기서 우리나라의 비료정책에 대하여 한가지 지적하고 이 글을 맺고자 한다. 우리나라는 지금까지 비료의 생산 및 판매가 주로 정부에 의하여 주도되었고 또한 그 사용도 식량작물 및 산림용 등으로 제한되어 왔기 때문에 지속성비료의 개발에 따른 특수작물 및 특수토양 그리고 가정용 등의 비료시장이 개척되지 않은 상태이다. 외국의 경우를 보면 각종의 비료를 손쉽게 구할 수 있고 그 용도도 소비자에 따라 다양하기 때문에 지속성비료와 같은 특수비료의 사용이 활발하여 미국에서만도 1970년의

Table 5. Fertilizer Production and Consumption in Korea*

단위: 천톤

내 용	1971 년	1977 년
생 산 능 력	1329	2908
생 산 실 적	1333	2410
농협인수실적	1275	1739
소 비 실 적	1310	1661
수 출 실 적	121	673

* 인용문헌: (3)

매상고가 약 2억불에 이르고 있다.²⁰⁾ 더구나 우리나라의 경우에는 비료의 생산능력이 소비량보다 훨씬 많아 Table. 5에 보는 바와 같이 1977년의 생산능력 290만톤에 비하여 실제의 생산은 240만톤이며 더구나 소비량은 166만톤밖에 안된다. 잉여생산량의 해외수출을 기할 수 있겠으나 비료가격의 불균형이 문제로 되고 있다. 따라서 지속성비료와 같은 특수비료의 개발로 국내 비료사용의 효율화 및 시장개척은 물론 부가가치가 높은 비료를 수출함으로써 가격의 불균형을 개선하는 비료정책이 이루어져야 할 것이다.

끝으로 이 분야에 관심이 있는 분들을 위하여 본문에 인용된 문헌외의 최근의 총설문헌^{44~57)}을 수록하니 참고하기 바란다.

6. 참고 문헌

1. FAD연감, 1977.
2. 농림통계연보, 대한민국 농수산부, 1979, p. 14, p. 58.
3. 비료연감, 한국비료공업협회, 1979, p. 299.
4. F.E. Allison, Advan. Agron., 18 (1966), 219.
5. O.R. Lumt, Int. Cong. Soil. Sci., Trans. 9th. III. (1968), 377~383.
6. 1973년 농촌진흥청 실험결과.
7. 문 상흡, 고 영찬, “화학공학” 13 (1975), 181.
8. G.L. Bridger and J.F. McCullough, U.S. Pat. 3, 174, 844 (1965).

9. I. Christoffel and P.N. Strother, U.S. Pat. 3, 392, 007 (1968).
10. W.C. Dahnke, O.J. Attoe, L.E. Engelbert and M.D. Groskopp, *Agron. J.* **55** (1963), 242.
11. E.W. Harvey, U.S. Pat. 3, 006, 753 (1961).
12. R.A. MacArthur, U.S. Pat. 3, 174, 845 (1965).
13. K. Szepesi, T. Jansco and J. Varga, U.S. Pat. 2, 991, 170 (1961).
14. F.D. Hoblit, U.S. Pat. 3, 252, 785 (1966).
15. P.W. Brewster and R.E. Emond, U.S. Pat. 3, 219, 433 (1965).
16. R. Powell, "Controlled Release Fertilizers," Chemical Process Review No. 15, Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J. 1968.
17. Y. Araten, "New Fertilizer Materials," Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J., 1968.
18. A.V. Slack, "Fertilizer Developments and Trends," Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J., 1968.
19. K.G. Clark, J.Y. Lee and K.S. Love, *Ind. Eng. Chem.*, **40** (1948), 1178.
20. R.D. Hauck and M. Koshino, "Fertilizer Technology and use," 2nd ed., Soil Science Soc. of America, 1972, pp. 455~494.
21. D.H. Parish, "Possibilities for the Improvement of Nitrogen Fertilizer Efficiency in Rice Production," IFDC, Muscle Shoals, Al., 1979.
22. H. Brandeis, H. Petersen and R. Fikentscher, U.S. Pat. 3, 190, 741 (1965).
23. T. Ushioda, *Jap. Chem Quart.*, **5** (1969), 27.
24. E. Komatsu, *Chem. Econ. Eng. Rev.*, **1** (1969), 51.
25. H. Toyoda, A. Hatakeyama and M. Sakurai, *Proc. of the Brit. Sulful Corp. Second Int. Conf. on Fertilizer*, London, England, (1978).
26. W. Riemenschneider, *Chemtech*, **6** (1976), 658.
27. T. Hayase, *Bull. Nat. Inst. Agr. Sci. (Japan)*, Series B, **18** (1967), 129.
28. S. Nakagawa and Y. Arai, *Japan Kokai* **75** (1975), 858.
29. W.F. Symes and L.E. Loveless, U.S. Pat. 3, 061, 423 (1962).
30. J. Murray, *Brit. Assoc. Adv. Sci. Rpt.*, 27th Meeting, (1857), pp. 54~55.
31. R.P. Bartholomew and K.D. Jacob, *J. Assoc. Offic. Agr. Chemists* **16** (1933), 598.
32. G.L. Bridger, M.L. Salutsky and R.W. Starostka, *Agr. and Food Chem.* **10** (1962), 181.
33. C.C. Legal and B.L. Mobley, U.S. Pat. 3, 320,048 (1967).
34. *Chemical Engineering*, Dec. 23 (1974), 32.
35. E.D. Huttman, A.R. Shirley, G.M. Blouin and B.P. Dana, "Experience of TVA with Sulfur-Coated Urea and other Controlled Release Fertilizers," TVA Circular Z-59, 1975.
36. R.B. Diamond, *Rice Farming*, **9** (1975), 6.
37. R.A. Hendrie, "Granulated Fertilizers," Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J., 1976, pp. 256~285.
38. L.I. Hansen, U.S. Pat. 3, 223, 518 (1965).
39. Florida Registration No. 758~1000.
40. G.M. Blouin, "Sulfur-Coated Urea: Estimated Cost in a Developing Country," TVA Bulletin Y-82, Oct. 1974.
41. "지속성 비료의 개발" 한국과학기술연구소, 1975.
42. Annual Report, IFDC, Muscle Shoals, Al., 1979.
43. O.P. Engelstad, J.G. Getsinger and P.J. Stangel, "Tailoring of Fertilizers for Rice," TVA Bulletin Y-52, 1972.
44. L.H. Davis, *Proc. No. 153, Fertilizer Soc.*, London (1976).
45. C.W. Fowler, "Urea and Urea Phosphate Fertilizers," Chemical Technology Review No. 59, Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J., 1976.
46. N.B. Makarov, *Agrokimiya*, **10** (1975), 144.

47. R. Prasad, G.B. Rajale and B.A. Lakhdive, *Advan. Agron.*, **23** (1971), 337.
48. R.D. Hauck, in "Organic Chemicals in the Soil Environmemt," C.A.I. Goring, J.W. Hamaker, Eds., Marcel Deckker, N.Y., 1972.
49. L.M.J. Verstraeten, *Agricultura*, **21**(1973), pp. 67~145.
50. G.E. Osburn, *Hercules Chem.*, **63** (1971), 11.
51. M.N. Nabieu, *Uzb. khim. Zh.*, **16** (1972), 4.
52. Shanghai Chem. Eng. Eng. Inst., Peop. R. China, *Hua Hseuh Tung Pao*, **1** (1976), 50.
53. T.P. Murray and R.C. Horn, "Organic Nitrogen Compounds for Use as Fertilizers," IFDC, Muscle Shoals, Al., 1979.
54. M.E. Pozin, et. al., *Khim. Prom-St. (Moscow)*, **2** (1978), 109.
55. Neija Nieto and Jorge Juan, *Ing. Quim.*, **9** (1977), 121.
56. G.C. Sharma, *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, **11** (1979), 107.
57. M. Yamaguchi, *Kagaku to Seibutsu*, **13** (1975), 703.