'97 Geosynthetics Conference / 28 November, 1997 / Seoul / Korea

저습답 배수개선을 위한 수평 플라스틱 드레인 적용에 관한 연구
A STUDY ON APPLICATION OF LATERAL PLASTIC-BOARD DRAINS FOR DRAINAGE IMPROVEMENT OF CONTINUOUS MOIST PADDY FIELDS

박영목[1], Yeong-Mog Park, 안주환[2], Ju-Hwan Ahn, 김석열[3], Seog-Yeol Kim

[1]영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant professor, Dept. of Civil Eng., Yeungnam Univ., Gyongsan, Gyongbook.
[2]영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정 M.S. Student, Dept. of Civil Eng., Yeungnam Univ.
[3]농어촌진흥공사 농어촌연구원 과장 Section Chief, Rural Development Corporation

SYNOPSIS : This paper presents the development of drainage system for the continuous moist paddy fields using plastic board drain(PBD). Large scale test to investigate of discharge capacity of PBD, long-term clogging test using in-situ soils, design and manufacture of equipment with a view to easy and economical installation of PBD, and numerical analysis to find the optimum spacing of PBD, were carried out an aim of application of PBD at continuous moist paddy field.

The test results of lab. and in-situ reveal that the drainage performance of PBD are well compared with the conventional PVC pipe. It suggested that the PBD are able to use and effective materials of drainage system of continuous moist paddy field.

주요어 : 저습답, 배수개선, 플라스틱 보드 드레인(PBD), 배수성능, 타설장치, 적정 타설간격

1. 서 론

국내 농업여건의 변화에 적극 대처하기 위한 일환으로 암거배수공법의 적용에 의한 저습답의 배수개선사업이 지속적으로 실시되고 있다. 현재 우리 나라의 저습답은 농지면적 총 129만ha의 9%를 점유하는 12만ha로써(농어촌진흥공사, 1993), 농작물 생산성 향상 및 노동력 절감을 위하여 배수개선이 시급히 요망되는 상태이다.

저습답을 배수 개선함에는 배수기능이 뛰어나며 배수재의 설치 작업에 있어서도 간편하고 경제적인 암거배수공법의 제시가 필요하다. 현재까지 국내, 외에서 저습답의 배수불량을 개선하기 위한 암거배수의 이용에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나, 이들은 PVC 유공관과 그 주위에 소수재를 포설하는 공법을 일관되게 사용하고 있는 실정이다. 또한, 암거의 설치작업에 많은 노력과 비용이 소요되고 있을 뿐만 아니라 암거 설치 장비가 고가이므로 국내 소유장비가 2대에 불과하여 매년 극히 제한된 소규모의 저습답 개량이 이루어지고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 농업여건 개선 및 생산성 향상에 능동적으로 대처하기 위하여 배수 불량한 저습답에 배수재로서 시공성, 경제성 및 품질관리의 효율성이 뛰어난 플라스틱 보드 드레인(plastic board drain, PBD)재의 적용 가능성을 종합적으로 검토하기로 한다. 아울러 농민이 직접 트랙터를 이용하여 저렴하고 간편하게 PBD를 타설할 수 있도록 장비를 고안, 제작하여 동시다발적으로 넓은 저습답을 개량할 수 있게 한다.

세부적인 연구내용으로서는 1)플라스틱 드레인재의 물리, 역학적 특성 규명, 2)실물대형 플라스틱 드

레인재의 배수성능 및 코어통수능력시험, 3)현장시험에 의한 재래공법과의 배수효과 비교검토, 4)드레인 설치 장비 고안·제작, 5)실측 및 해석에 의한 드레인재의 최적간격제시, 6)설계 및 시공에 관련된 문제점 도출과 보완, 7)플라스틱 드레인재가 환경에 미치는 영향검토 및 8)설계, 시공 매뉴얼 작성 등이 포함되어 있으나(김 등, 1997), 본 고에서는 지면관계상 상기의 연구내용중 2), 3), 4) 및 5)에 관하여 간단히 기술하고자 한다.

2. 필터의 구멍 막힘

PBD자체의 부직포 필터(non-woven filter)가 저습답의 간극수를 배출하기 위한 충분한 투수성능을 유지함은 물론, 직접 접촉하고 있는 저습답의 세립토 부착이 발생한 뒤에도 확실한 배수기능을 발휘할 수 있는 능력을 확보해야함이 무엇보다 중요하다.

PBD재 필터(filter)의 실내 투수시험 결과는 국내·외 제품 모두 최저치가 약 1×10^{-1}㎝/sec를 나타내어 저습답 토양의 $1\times10^{-5}\sim1\times10^{-7}$㎝/sec에 비하여 충분히 큰 값을 나타내므로 본 고에서 언급을 생략하기로 하고 구멍 막힘(clogging)현상의 검토에 대한 내용을 간략히 기술한다.

구멍 막힘 시험을 ASTM D5101의 시험법을 참고로 하여 실시한 결과, 본 실험에서 이용한 4종류의 PBD재 필터는 모두 동수구배율(Gradient ratio, GR)이 3.0이하의 값을 나타내어 구멍 막힘 현상에 대하여 안전한 값을 나타냈다. 특히, 저습답에서의 간극수의 흐름은 낮은 동수구배를 갖는 조건이므로 구멍 막힘에 대해서는 충분히 안전하다고 추찰된다. 또한, 구멍 막힘에 의한 기능저하현상은 장기간에 걸친 구멍 막힘 시험을 실시하여 저습답의 조건을 그대로 반영한 상태에서 검토할 필요가 있다고 사료되어 국내의 대표적인 저습답 토질조건인 목포시료 및 대호시료를 대상으로 약 7개월에 걸친 장기간 구멍 막힘 시험을 실시하여 그 결과를 그림 1.에 나타냈다.

그림 1.에서 알 수 있는 바와 같이 약 7개월(213일)간의 측정결과 시험재료로 이용한 대호 및 목포시료 모두 약 1,000시간(42일)까지는 시험시료중의 기포가 불완전하게 제거되는 등의 문제에 기인하여 높은 수치의 동수구배율을 나타내는 등 불안정한 상태를 나타내고 있으나, 그 이후는 동수구배율이 약 1을 나타내어 안정한 상태로 유지되고 있음을 알 수 있다. 물론 경작지에 직접 시험시공을 실시하여 경운 작업 등을 반복하는 등의 현장조건을 고려하고 수년간에 걸친 장기간의 구멍 막힘 시험을 실시하여 정확한 특성을 규명하는 것이 원칙이나 본 연구에서는 연구기간의 제약으로 경과시간을 약 7개월로 제한하였으나, 전반적인 경향을 볼 때, 외적요인에 의한 PBD의 손상 등이 발생하지 않는 한, 필터의 구멍 막힘에 기인된 배수성능저하는 저습답에서 거의 발생할 가능성이 적다고 판단된다.

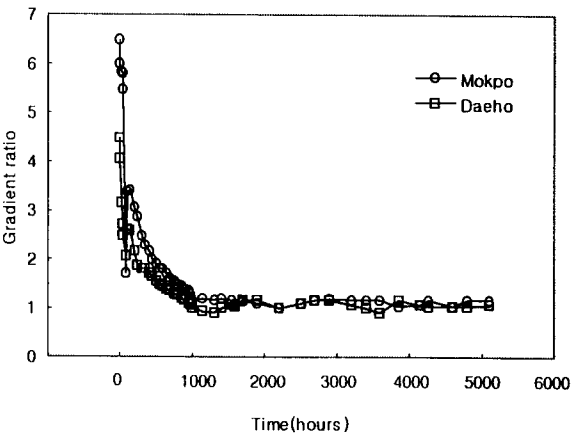

그림 1. 장기간 필터의 구멍 막힘 시험결과

3. 수평 통수능력

PBD재를 수평으로 타설하여 저습답의 배수개선을 실시함에 있어서 PBD재 내부에서는 간극수의 흐름에 대한 저항, 즉 웰 레지스턴스(well resistance)의 영향이 작용하게 되므로 이들의 영향을 고려한 1본의 적합한 PBD재 길이의 산정과 현장조건에 적합한 동수구배 및 측압 조건하에서 실내시험을 실시할 필요가 있다. 이와 같은 현장조건을 고려한 상태에서 PBD통수능력시험을 실시하여 그 결과를 검토함으로써 PBD재를 저습답 배수개선사업의 종래 흡수관 대용으로서의 유효활용이 가능하게 될 것이다.

PBD재의 통수능력(discharge capacity, Q_w)시험을 실시하기 위하여 본 연구에서 고안, 제작한 특수 대

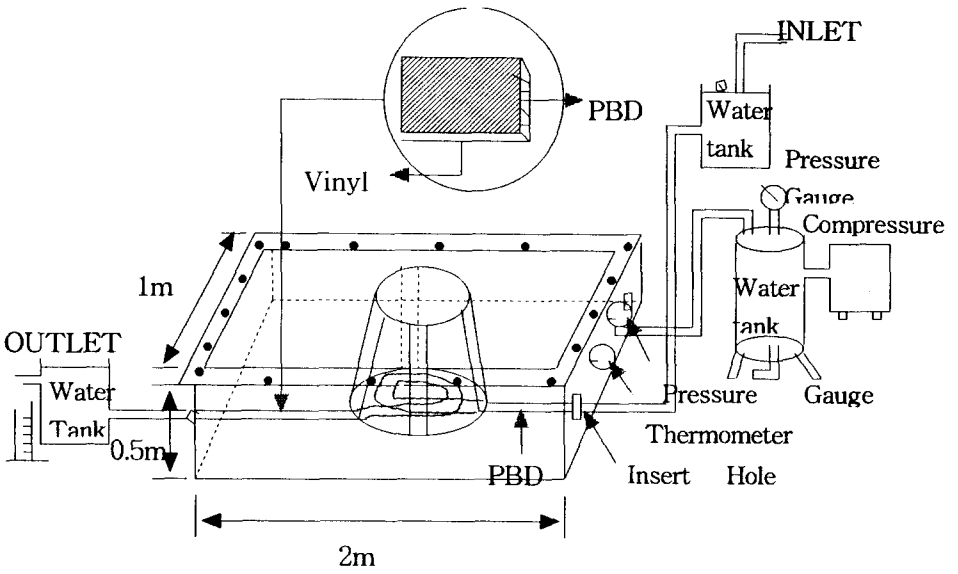

그림 2. 대형 PBD재 코어 통수능력 시험장치 개략도

형 코어 통수능력 시험장치(A×B×H=1.0×2.0×0.5m)를 이용하였다. 그림 2.에는 대형 코어 통수능력시험장치도를 나타낸다. 이 장치는 지금까지 국내, 외에서 실내시험으로 실시한 예가 없는 현장실물길이의 PBD재를 이용하여 통수능력을 직접 산정하기 위하여 중앙부에 직경 1m의 PBD지지대가 장착되어 있으며 PBD재를 이 지지대에 1회전시키면 3.14m가 되므로 실물대형 PBD재의 통수능력시험을 직접 실내에서 실시할 수 있게 되어 있다.

그림 3.과 4.에는 측압 0.2kgf/cm^2 및 0.5kgf/cm^{2}의 조건에서 5가지 조건의 동수구배(i=0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0)상태에서 PBD재의 길이별로 통수능력을 산정한 결과를 나타낸다. 두 그림에서 동일 동수구배에 있어서 PBD재의 길이가 증가됨에 따라서 통수능력이 저하됨을 알 수 있다. 길이의 증가에 따른 통수능력의 저하는 PBD내부의 마찰손실수두가 증가함을 의미하고 있다.

실제 현장조건과 유사한 측압 0.2kgf/cm^{2}의 i=0.01인 경우 DH재의 길이 L=2m에서 10m로 5배 증가함에 따라서 통수능력 Q_w가 250cm^3/sec에서 217cm^3/sec로 약 13% 저하하는데 대하여 상대적으로 길이의 차이가 25배로 큰 L=50m의 통수능력은 Q_w=191cm^3/sec를 나타내어 저하량은 약 24%에 불과하여, 상대

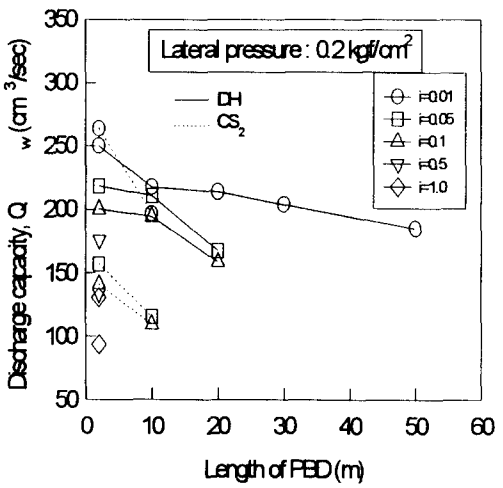

그림 3. PBD재의 길이별
통수능력의 변화(측압:0.2kgf/cm^2)

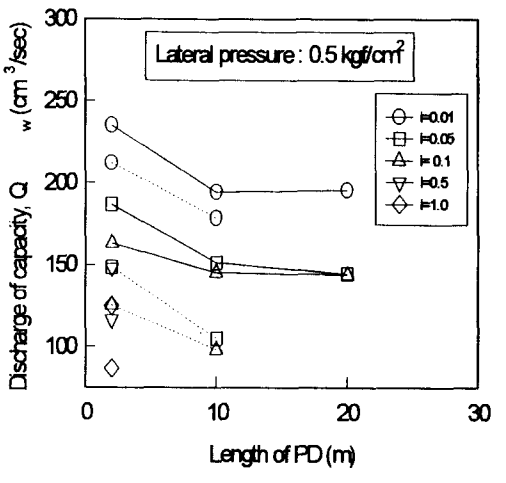

그림 4. PBD재의 길이별
통수능력의 변화(측압:0.5kgf/cm^2)

적으로 낮은 통수능력의 저하경향을 나타낸다.

측압 0.5kgf/cm^{2}에 있어서도 동수구배 i에 관계없이 측압 0.2kgf/cm^{2}에 대한 결과와 유사한 경향을 나타냈으며, 길이 L=10m인 경우와 L=20m인 경우의 통수능력의 차이는 거의 없다. 여기서도 상기 그림 5.를 대상으로 설명한 현장 실물대형의 PBD재 길이에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

지금까지 많은 연구자들에 의해 실시된 실내시험에 있어서는 PBD재의 샘플을 통상 1m이하로 하여 시험을 실시하고 측압, 동수구배 및 PBD재의 길이의 영향 등을 거론하고 있으나, 상기한 바와 같이 실물길이를 직접 적용한 시험결과 짧은 길이 PBD에 대해서는 웰 레지스턴스의 변화현상이 크지만 현장에 타설될 수 있는 수 십m의 길이 조건에 대해서는 통수능력에 미치는 길이의 영향이 그다지 크지 않음을 나타냈다. 이에 관한 연구는 추가적으로 실시할 계획이나, 지금까지 마찰손실수두의 개념이 길이에 대하여 일차원적으로 증가한다는 기본 개념과는 다소 상이한 결과임이 주목된다.

4. 현장시험

현장시험은 대표적인 2개소의 저습답에서 직접 종래의 배수재와 PBD재의 배수효과를 상호 비교하고, PBD재에 대한 배수재로서의 유효성 검토, 타설방법에 따른 배수영향 및 배수재의 간격결정 등 배수 매커니즘을 규명할 목적으로 실시하였다. 시험포의 선정은 관리가 용이하고 지하수위가 1m이내이며 국부적인 용출수가 발생하는 않는 곳으로 내륙지(전북 익산군 주곡지구)와 간척지(대호 간척지구)의 각각 1개소씩 선정하였다.

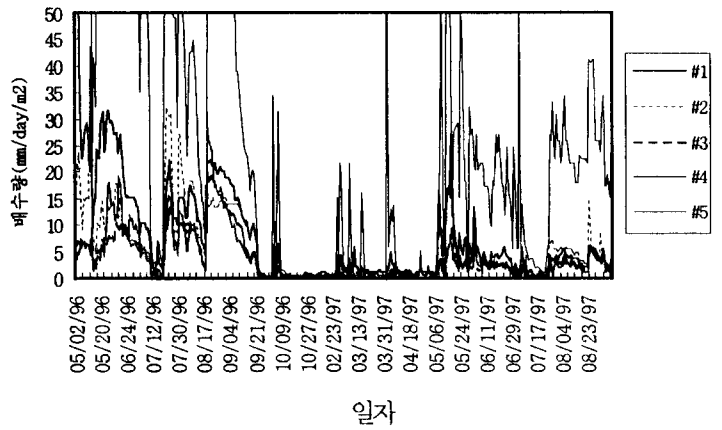

그림 5. 배수재에 따른 일별 배수량(주곡지구)

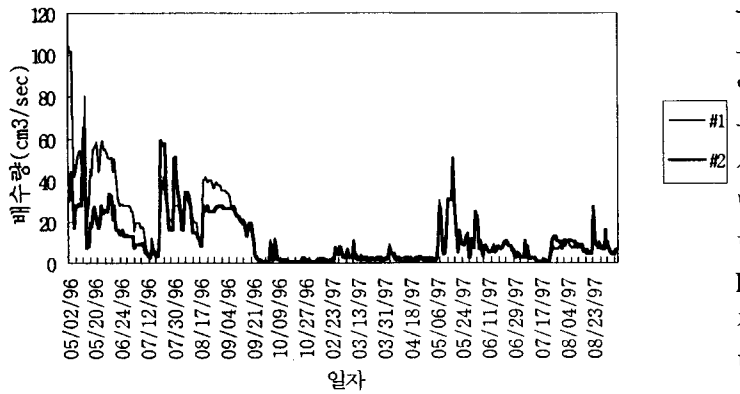

그림 6. PBD의 타설간격에 따른 배수량 비교

배수성능을 상호 비교하기 위하여 시험포는 각 제품별로 폭 10m 및 저습답 외곽을 비닐을 이용하여 칸막이를 설치하여 서로 수위의 영향을 받지 않게 완전 분리한 뒤에 각 배수재를 설치하였다. 주곡지구와 대호지구의 배수시험은 각각 '96. 5.1부터, '96.7.1부터 실시하였는데 주곡지구에서 각 배수재에 따른 일별 단위면적당 배수량은 그림 5.와 같다.

그림 5.에서 #1은 밴드형 PBD재로서 PBD재 면을 연직으로 세워서 2m 간격으로 타설한 경우이며, #2는 PBD재 면을 뉘어서 2m간격으로 타설한 경우이고, #3은 PBD재 면을 세워서 5m간격으로 타설한 경우이다. 그리고 #4는 PBD재 면을 세워서 5m 간격으로 타설하되 소수재(왕겨)를 사용한 경우이다. #5는 PVC유공관에 소수재(왕겨)를 사용하여 10m간격으로 타설한 경우이다. 현장시험결과 종래의 PVC유공관의 배수효과가 탁월한 것을 알 수 있으나, PBD재도 충분한 배수성능을 발휘하고 있음을 나타낸다.

PBD재가 저습답에 사용 가능한지 여부를 검토하기 위해서는 PBD재의 배수량과 계획배수량을 비교하면 될 것이다. 계획배수량은 농지개량사업설계기준(배수편)(농수산부, 1983)에 벼1모작일 경우 10~20mm/day 배

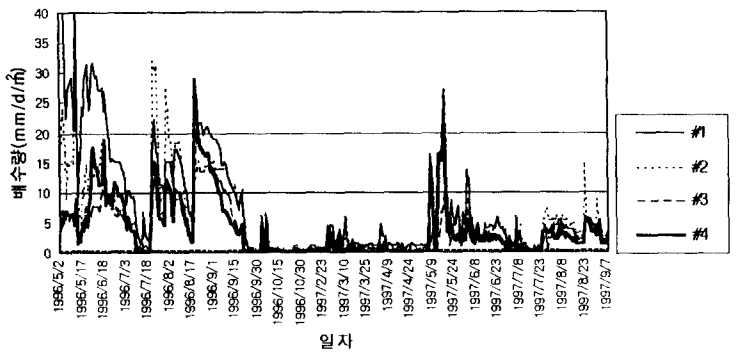

그림 7. 타설방법에 따른 배수량 검토

제하는 것으로 되어있다. 따라서, 이것을 기준치로 할 때 그림 6.과 같이 플라스틱 드레인 간격이 2m(#1 ,#2)인 경우에 충분히 배제하는 것으로 나타났으나, 간격이 5m(#3, #4)인 경우에는 계획배수량을 하회하는 것으로 나타나 적절한 타설간격은 2m인 것으로 판단된다.

그림 7.은 PBD재를 2m간격으로 설치한 경우인데 #1은 연직방향으로 면은 세워서 설치하였고, #2는 수평방향으로 뉘어서 설치하였다. 설치 당해년도(1996)는 면을 세워서 설치한 경우가 효과가 큰 것으로 나타났으나, 차년도(1997)에는 거의 비슷한 배수효과를 나타내고 있다.

위에서 본 바와 같이 타설시 PBD재를 세워서 설치한 경우가 배수효과 측면에서 유리하다고 사료되며, 양자의 차이는 타설시 발생하는 지반교란 범위(smear zone)의 차이에 기인되는 현상으로 판단된다.

5. 플라스틱 드레인 설치장치의 고안, 제작

공장제품으로 신소재인 PBD재를 종래의 PVC유공관 대용으로 흡수관으로 이용하여 경제성과 시공성을 제고하며 동시 다발적으로 배수개선사업을 수행할 수 있게 하기 위하여 농용기인 트랙터를 이용하여 농민이 직접 설치 가능한 드레인 설치 장비를 고안·제작하였다. 드레인 설치장비의 규모는 B×L×H = 70×230×130cm이며, 드레인(PBD)재는 판형 드레인과 원형 드레인의 2종류가 있으므로 이들을 모두 타설할 수 있도록 2종류의 드레인 설치장비를 제작하였다. 드레인 설치장비는 크게 6부분으로 구성되며, a) 트랙터와 연결부, b) 쟁기, c) 디스크형의 드레인 타설 유도판, d)드레인 장착장치, e) 드레인 송출링(장착부와 유도관 사이에 위치) 및 f) 되메움 판 등이다.

드레인 설치장비를 이용하여 연약한 토질특성을 보이는 간척지구인 전남 목포의 영산강 사업지구, 내륙지구인 전북 익산군의 주곡지구 및 대호지구 현장 시험포에서 3회에 걸친 현장 타설시험을 실시한 결과 자체적으로는 문제없이 PBD재를 일정심도로 타설할 수 있음이 판명되었다. 드레인 타설장비는 총중량이 약 310kg이므로 소수의 인원으로 운반 및 탈, 부착이 곤란하며 취급상 위험이 예상되므로 타설장비를 4개부분으로 분리 가능하게 하여 평균 80kg정도의 중량이 되게 하였다.

트랙터로 드레인 타설장치를 현장에 운반하여 현장에서 조립하는데 3인의 기술자로 판형 및 원형이 각각 19분, 15분이 소요되었으며, 해체시에는 각각 6분, 5분이 소요되어 운반 및 해체, 조립에 특별한 문제점은 없다. 본 연구는 저습답 표층의 지지력 부족에 기인되어 트랙터바퀴의 빠짐을 방지하기 위한 장치, 드레인을 일직선의 수평으로 타설되도록 고안된 유도장치 등의 고안, 제작도 추가되어 타설시 문제가 유발되지 않도록 하였으며, 타설장비는 현재 특허출원중이다.

6. 2층 스미어 존에 의한 수치해석

Madhav, Park and Miura(1993)는 스미어 존의 실측치에 근거하여 PBD재의 특성을 고려한 2층 스미어 존 모델을 제안하였다. 그러나, 이는 연직배수에 대한 이론이므로 수평 드레인에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 PBD를 수평 방향으로 타설할 경우에 있어서 테르자기(Terzaghi)의 2차원 압밀식을 토대로 저습답의 현장조건을 충분히 반영하여 PBD타설시 지반의 교란과 경운 작업에 기인된 표층의 교란영향을 고려하여 다음과 같이 이론식을 정립한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vz}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_{vx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{1}$$

먼저, $\varepsilon(z,x,t) = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} = \frac{\sigma - u}{\sigma} = 1 - \frac{u}{\sigma}$ 로 두면,

$$u = \sigma - \sigma \cdot \varepsilon \tag{2}$$

이 된다. 여기서, $u=0$ 이면 $\varepsilon=1$ 즉, $U=100\%$이고, 또한, $u=\sigma$ 이면 $\varepsilon=0$, $U=0\%$이다. 그리고, σ는 전응력이므로, x, z, t에 관계하지 않으므로 식(2)를 이용하여 식(1)은 아래와 같이 정리된다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_{vz}\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} + c_{vx}\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} \tag{3}$$

이 된다. 식(3)에 explicit Dufort-Frankel Finite Difference Method(1953)를 적용하여 해석을 실시하였다. 그림 8.에는 본 연구의 수치해석에 유한차분법을 적용하기 위한 모델의 개념도를 나타낸다.

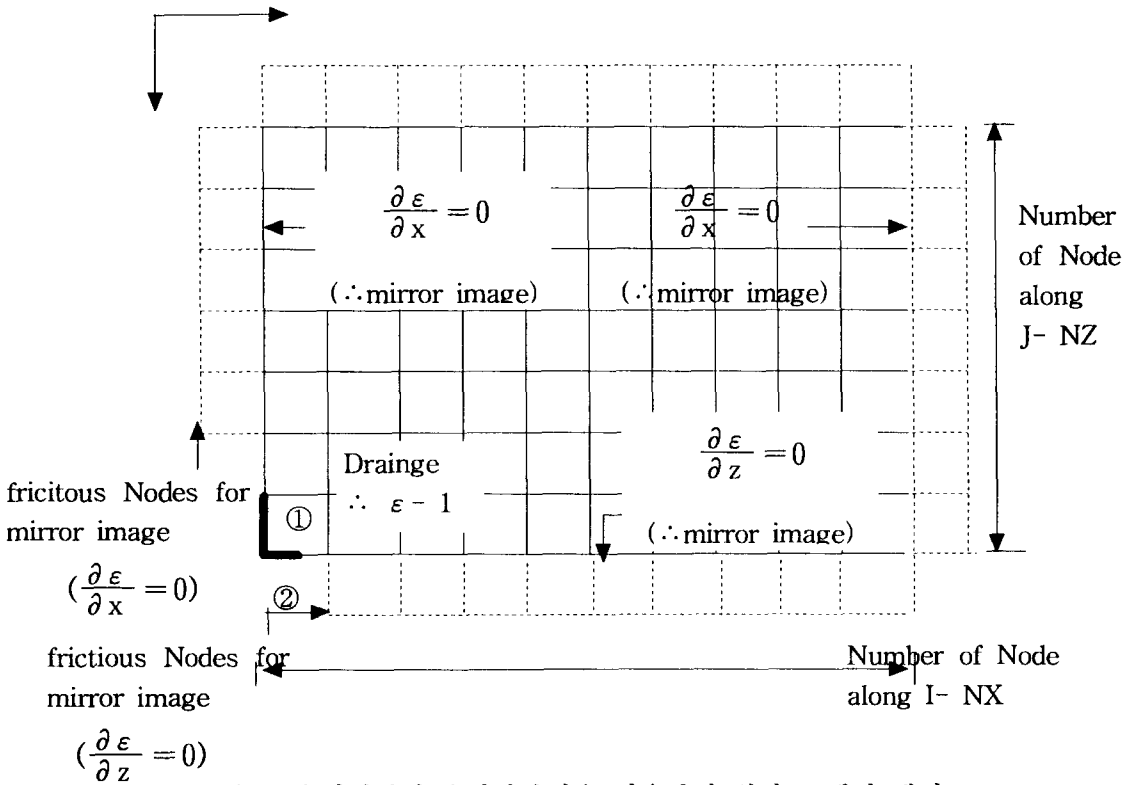

그림 8. 수치해석에 유한차분법을 적용하기 위한 모델의 개념도

그림 8.의 모델도를 근거하여 PBD는 단면의 폭을 중심으로 연직(세움, ①)형과 수평(뉘움,②)으로 설치하게 하였으며, 스미어 존은 PBD타설에 의해서는 연직형·수평형의 내부와 외부를 각각 7.5cm, 15cm로 하였다. 경운 작업에 기인된 스미어 존은 표층으로부터 두께 15cm를 완전교란 존, 그 하부 30cm를 불완전교란 존으로 하였다. 타설된 1차년도에는 타설과 경운작업의 양자에 의한 교란을 같이 고려하고 타설후 1년이 경과한 다음은 경운 작업에 의한 교란만 고려되게 하여 해석을 실시하였다.

그림 9.와 10.에는 표 1.에서 주어진 조건으로 압밀정수를 설정하여 PBD에 대한 스미어 존의 영향, 타설간격의 영향 및 타설모양에 대한 영향을 각각 검토하였다.

표 1. 적용 압밀계수 및 조건

조건		시간(day)	압밀도(U, %)	비 고
연직	2m no smear	23	90.37	c_{vx} ◀ ▼ c_{vz}
	2m smear	36	90.10	
수평	2m no smear	32	90.09	
	2m smear	50	90.16	그림 9. 및 10. 압밀계수 : no smear(No smear zone) $c_{vx1}=c_{vx2}=c_{vx3}=1000cm^2/d$ $c_{vz1}=c_{vz2}=c_{vz3}=600cm^2/d$ smear(Smear zone) 400, 600, 1000cm^2/d 400, 500, 600cm^2/d
연직	5m no smear	90	90.64	
	5m smear	150	90.16	
수평	5m no smear	110	89.97	
	5m smear	180	89.90	

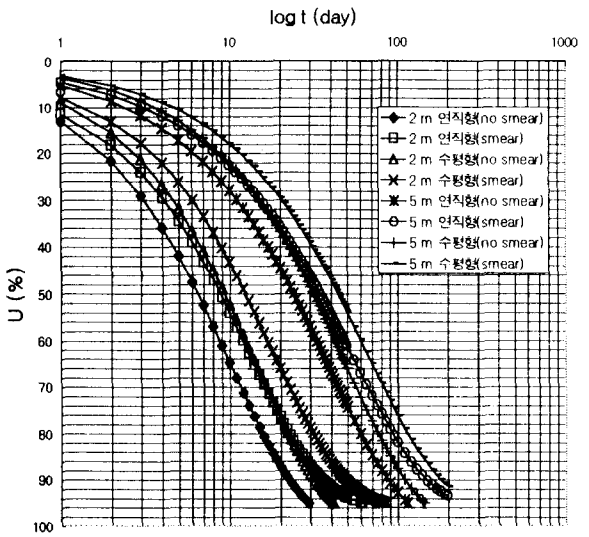

그림 9. 스미어 존의 영향

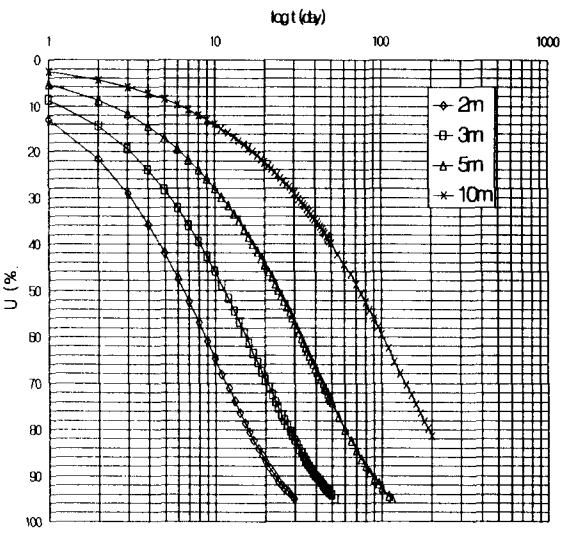

그림 10. 타설간격의 영향

그림 9.에는 타설간격 2m와 5m에 대하여 no smear zone의 경우는 수평방향 압밀계수 C_{vx}를 모두 1,000cm^2/d, 연직방향은 C_{vz}=600cm^2/d로 하고, 그 smear zone투수계수가 저하되게 한 상태이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 연직방향(세움)으로 PBD를 타설한 것이 수평방향(뉘움)보다 배수속도가 빠르며, 타설간격 2m에 대한 값이 5m보다 빠른 배수특성을 나타낸다. 또한 2층의 smear zone이 발생할 경우 no smear에 대하여 압밀도 90%를 기준으로 비교한 결과 평균 40.25일로 62.2% 지연됨을 알 수 있다.

그림 10.에는 No smear zone인 경우 압밀계수를 수평방향인 C_{vx}=1,000cm^2/d, 연직방향 C_{vz}=600cm^2/d로 가정하여 타설간격에 대한 영향을 고려하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 타설간격이 넓어질수록 배수일수가 증가하며 압밀도 80%에 대하여 타설간격 2m와 5m를 비교하면 각각 16일, 200일을 나타내어 매우 큰 차이를 나타낸다. 이 결과는 4장에서 언급한 현장시험 결과와 유사한 경향을 보이며 PBD의 적정 타설간격은 2m로 함이 합리적인 것을 나타낸다.

실제로 저습답에는 증발산량이 발생하고 벼의 뿌리와 지반사이의 틈이 존재하므로 배수속도는 이론적인 계산치 보다는 빨라질 가능성이 있으므로 이와 관련된 고찰은 향후 현장시험 결과 등을 고려하여 상세히 보고할 예정이다.

7. 결 론

저습답의 배수개선사업에 배수재로 신소재인 플라스틱 보드 드레인을 적용하기 위한 3개년간의 종합적인 연구를 실시하여 얻어진 일부의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 저습답 현장토를 사용하여 7개월에 걸친 장기간의 필터 구멍 막힘 시험 결과 동수구배율이 약 1을 나타내어 구멍 막힘에 의해 배수기능 저하는 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다.
2) 실물대형의 PBD재를 이용하여 통수능력시험을 실시한 결과, 길이의 증가에 따라 마찰손실수두가 일정하게 증가하지 않음을 확인하였으며, 이는 지금까지의 웰 레지스턴스의 개념과 다소 상이한 결과로 주목된다.
3) 농민이 트랙터를 이용하여 직접 PBD를 간편하고 경제적으로 타설할 수 있도록 타설장비를 고안, 제작하였으며, 3곳의 저습답에서 시험 가동하여 만족할 만한 결과를 얻어 특허출원 중이다.
4) 저습답 현장에서 종래 PVC유공관과 PBD의 배수성능을 비교한 결과, PBD의 성능은 다소 떨어지나 농지개량 사업설계기준에 명시된 1일 배수량을 상회하는 값을 나타내며, 적정타설 간격은 2m인 것을 알았다.
5) PBD를 연직(세움)형으로 타설하는 것이 수평(뉘움)형보다 타설시 지반교란 범위가 적어지므로 타설년도에 배수효과가 뛰어나는 것으로 판단된다.
6) Terzaghi의 2차원 압밀식을 근거로 PBD타설 및 경운 작업에 의한 교란효과를 고려한 2층 스미어존 모델을 제안하여 저습답의 적정 개량일수 산정 및 지반조건에 적합한 최적의 PBD타설간격 결정을 간편하게 할 수 있게 하였다.

감사의 글

본 연구는 농림부에서 시행한 농림수산 특성연구사업으로 1995~1997(3개년간)에 걸쳐 수행된 연구결과의 일부이며, 연구비를 지원해 준 농림부에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김석열, 박영목, 김호일, 홍변만 (1997), "플라스틱 드레인재를 이용한 저습답의 배수 개선에 관한 연 구", 최종보고서(요약), 농림부, pp. 1~78.
2. 농수산부 (1983), "농지개량사업 계획 설계기준", 배수편, p. 239.
3. 농어촌 진흥공사 (1993), "농경지 이용율 제고를 위한 최적설계기법 연구", pp. 1~242.
4. Hoffman, J.D. (1993), "Numerical Methods for Engineerings and Scienticts", McGraw-Hill, Inc. pp. 683~686.
5. Madhav, R.M., Park, Y.M., and Miura ,N. (1993), "Modelling and study of smear zones around band shaped drains, Soils and Foundation", Vol. 33, No. 4, pp. 135~147.