

ACC Deaminase와 식물호르몬 생성 세균 처리에 의한 토마토 식물의 가뭄 조건에서의 생장

서미소 · 송홍규*

강원대학교 자연과학대학 생명과학과

Growth Promotion of Tomato Plant under Drought Conditions by Treatment of Rhizobacteria Producing ACC Deaminase and Phytohormones

Mi-So Seo and Hong-Gyu Song*

Department of Biological Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea

(Received January 23, 2013 / Accepted March 19, 2013)

Some rhizobacteria producing 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase can make plant to continue growth under the stress conditions through lowering the level of phytohormone, ethylene which inhibits the plant growth and accelerates plant aging. In this study, some rhizobacteria producing ACC deaminase have been isolated from the rhizosphere of plants grown at sand beaches, and identified as *Escherichia hermannii* m-2, *Enterobacter asburiae* m-4, *Pseudomonas thivervalensis* BD2-26 and *Pseudomonas brassicacearum* subsp. *neaurantiaca* BD3-35 through sequencing of 16S rRNA genes. Strain BD3-35 showed the highest activity of ACC deaminase among the isolates, 20.26 α -ketobutyrate μ M/mg protein/h. Strains BD3-35 and BD2-26 secreted a phytohormone cytokinin, and strains m-4 and m-2 could produce auxin and abscisic acid, respectively. When these bacteria were applied to the 7-day old tomato plant under drought stress for 7 days, strains BD3-35, m-2, and m-4 increased the length of tomato root by 14, 15, and 35%, respectively, and strains m-2, BD2-26 and BD3-35 increased the dry weight of tomato plant by 22, 33, and 68%, respectively compared to the uninoculated control tomatoes. Therefore, these rhizobacteria may be utilized as a microbial fertilizer for the plants under drought stress.

Keywords: ACC deaminase, drought stress, phytohormones, plant growth promotion

최근 들어 대기 중 온실가스 증가를 통한 지구온난화에 의해 이상기후 현상이 빈번해질 가능성이 높아지는데, 2012년에는 심한 폭염과 가뭄이 세계 주요 곡창지대에 영향을 미쳐 국제 곡물 가격이 크게 상승하였다(Sung *et al.*, 2012). 이와 같이 지구 온난화에 의한 일부 지역에서의 가뭄은 작물 생산에 피해를 줄 것이 예상되므로 이에 대응하여 작물을 보호할 수 있는 효과적인 방법이 필요하다. 가뭄을 포함한 다양한 종류의 악조건이 식물에 가해지면, 식물 조직에서 에틸렌(ethylene)의 생성이 증가하는데(Morgan and Drew, 1997), 에틸렌은 기체형 탄화수소의 형태로 열매의 숙성을 촉진하며 식물의 뿌리생장과 개화를 억제시킨다(Glick *et al.*, 1998). 일반적으로 에틸렌은 식물이 노쇠하거나 성숙하는 동안에 만들어지지만 각종 스트레스에 대한 반응으로 생성되어 식물 생장을 억제하기도 하여 stress ethylene이라고도 부른다(Abeles and Abeles, 1972).

식물생장촉진 근권세균(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)은 근권이나 근면에 존재하는 다양한 종류의 세균으로 직

간접적 방식으로 식물 생장을 향상시킨다(Ahmad *et al.*, 2008). 직접적 생장촉진은 세균으로부터 합성되는 생장촉진 화합물을 식물체에 제공하거나, 환경으로부터 영양분 활용을 가능하게 하여 이루어지며, 간접적 생장촉진은 식물 병원체의 해로운 영향을 감소 또는 예방시켜 일어난다. 이러한 작용의 예로 균주가 생성하는 식물생장촉진 호르몬을 식물에 제공하거나 스트레스에 따른 피해를 감소시키는 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase 작용 등이 있다(Glick, 1995). ACC deaminase를 생성하는 세균은 뿌리 표면에서 에틸렌의 전구체인 ACC를 α -ketobutyrate와 ammonia로 가수분해하여 각각 탄소원과 질소 원으로 사용하고 뿌리 내의 ACC 농도를 감소시켜 결과적으로 식물체 내의 에틸렌 농도를 저하시킨다(Glick, 1995; Glick *et al.*, 1998). 이는 가뭄과 염분(Mayak, 2004), 홍수(Grichko and Glick, 2001) 그리고 중금속(Grichko *et al.*, 2000) 등에 의해 생성되는 stress ethylene의 영향을 막아 식물이 스트레스 상황에서 생장할 수 있게 도와준다(Penrose and Glick, 2003). 한편 일부 PGPR은 옥신(auxin), 시토키닌(cytokinin), 지베렐린(gibberellin), 앱시스산(abscisic acid; ABA) 같은 식물호르몬을 분비하여 각 호르몬의 기능에 따라 식물의 생장촉진에 기여한다(Glick,

*For correspondence. E-mail: hgsong@kangwon.ac.kr; Tel.: +82-33-250-8545; Fax: +82-33-251-3990

1995).

본 연구는 식물의 가뭄 스트레스 피해를 해결하기 위해 스트레스 상황에서 식물의 정상적인 성장을 방해하는 stress ethylene을 감소시키는 효소 ACC deaminase를 생성하고 더불어 식물생장촉진 효과가 있는 식물호르몬을 생성하는 균주를 선별하는 것을 목적으로 하였다. 그리고 실제로 선별된 균주들이 식물의 가뭄 스트레스 극복을 돕는지 토마토를 대상으로 조사하였다.

재료 및 방법

균주 분리 및 동정

식물의 가뭄 스트레스 하의 성장을 돕는 균주를 분리하기 위해, 수분 결핍과 염분 스트레스를 받는 사구식물의 근권에서 균주를 분리하였다. 경기도 을왕리 해수욕장에서 갯씀바귀(*Lxeris repens*)와 통보리사초(*Carex kobomugi*)를 채취하였고 강원도 경포해변 사구에서 맥문동(*Liriope platyphylla*)을 채취하였다. 채취한 식물의 뿌리에 붙어 있는 토양을 털어내고 생리식염수(0.9% NaCl)와 혼합하여 희석하고, LB 한천배지(Difco Lab, USA)에 도말하였다. 30°C에서 계대배양을 반복하여 균주들을 순수분리하였다. 갯씀바귀와 통보리사초 근권에서 각각 순수분리한 균주 BD3-35와 BD2-26, 맥문동 근권에서 분리한 m-2와 m-4를 동정하기 위해 (주)마크로젠에 16S rRNA 유전자의 염기서열 분석을 의뢰하였고, 얻어진 16S rRNA 유전자의 전체 염기서열을 EzTaxon server 2.1 (<http://147.47.212.35.8080/index.jsp>)을 이용하여 동정하였다.

균주의 ACC deaminase 생성능과 활성 조사

ACC를 유일 질소원으로 사용하여 성장하는 능력에 근거하여 균주를 선별하였다. 질소원이 존재하지 않는 DF salts 최소한천배지(Penrose and Glick, 2003)에 10 mM ACC 100 μ l를 도말하여 실험균으로 사용하였다. 질소원으로 2.0 g/L (NH₄)₂SO₄를 첨가한 것은 양성 대조균으로, 아무것도 첨가하지 않은 것은 음성 대조균으로 간주하였다. 순수분리한 균주들을 희석접종하여 3-14일 동안 30°C에서 배양하였고, 음성 대조균에선 성장하지 않았으나 양성 대조균과 대등하게 실험균에서 성장한 균주들을 선별하여(Govindasamy *et al.*, 2009) 이들을 대상으로 실험을 수행하였다.

ACC 이용능을 가진 균주들을 ACC 3 mM (0.5 M ACC stock 45 μ l)이 첨가된 7.5 ml의 DF 배지에 접종하여 배양한(24 h, 30°C, 200 rpm) 후 원심분리(3,000 \times g, 4°C, 20 min)를 통해 0.1 M Tris-HCl (pH 7.6)로 3번 세척 후 0.1 M Tris-HCl (pH 7.6) 1 ml와 섞는다. 이를 원심분리(16,000 \times g, 4°C, 5 min)하여 상등액을 제거하고 0.1 M Tris-HCl (pH 8.5) 600 μ l와 toluene 30 μ l를 첨가하여 toluenized cell을 만들었다.

ACC deaminase 활성은 toluenized cell을 이용하여 측정하였는데 활성 정도는 표준 α -ketobutyrate (α -KB)로 0.2-10 mM 범위의 표준곡선을 만들어 조사하였다. 단백질 정량은 toluenized cell을 Bradford assay를 이용하여 측정하였는데 정량은 bovine serum albumin으로 100-1,000 ppm 범위의 표준곡선을 만들어

측정하였다. 효소활성 결과는 균주 1 g이 한 시간 동안 생성한 α -ketobutyrate의 농도로 환산하여 나타내었다(μ M α -KB/mg protein/h).

식물호르몬 생성능 조사

ACC 이용능을 가진 선별 균주들의 대표적인 옥신 화합물인 indole acetic acid (IAA)와 indole butyric acid (IBA) 생성능을 측정하기 위해 전구물질인 L-tryptophan 3 mM을 넣은 90 ml nutrient broth (NB; Difco Lab) 배지에 균주를 접종하였고 배양하였다(30°C, 130 rpm). 24시간마다 배양액 1 ml를 추출하여 원심분리하고(10,000 \times g, 4°C, 20 min) 상등액 0.5 ml와 Salkowski 용액(H₂SO₄ 150 ml, H₂O 250 ml, 1.5 M FeCl₃·6H₂O 7.5 ml) 2 ml를 상온에서 30분간 반응시킨 후 IAA는 530 nm에서, IBA는 450 nm에서 흡광도를 측정하고 표준 IAA와 IBA (Sigma Co., USA)로 표준곡선을 만들어 정량하였다(Glickmann and Dessaux, 1995).

균주들의 다른 식물호르몬인 ABA와 cytokinin 생성능을 조사하였는데 균주들을 brain heart broth (BHB; Difco Lab.) 배지 100 ml에서 선배양 후(72 h, 30°C) 분광광도계를 이용하여 OD₆₀₀이 1이 되도록 보정하였다. 90 ml BHB 배지에 보정한 균주 10 ml를 접종하고 빛이 없는 조건에서 배양하였다(30°C, 200 rpm). 배양액을 원심분리(3,000 \times g, 4°C, 20 min)한 뒤 상등액 100 ml를 pH 2.5로 보정하고 ethyl acetate 15 ml를 첨가하고 분별깔때기에 넣고 extraction shaker (Recipro shaker RS-1, Jeio Tech)로 15분간 추출 후 ethyl acetate층을 모으는 과정을 3번 반복하여 총 45 ml의 ethyl acetate를 회수하였다. 모아진 ethyl acetate는 진공회전농축기(EYELA, Tokyo Rikakikai Co. Ltd., Japan)로 증발시킨 후에 methanol 5 ml에 녹여 0.22 μ m 지용성필터로 여과하였다. 정량분석은 high performance liquid chromatograph (Waters Co., USA)로 Luna 5 μ C18 column (250 \times 4.60 mm)(Phenomenex, USA)을 이용하였고, flow rate는 1 ml/min로 설정하였다. ABA는 0.1 M acetic acid를 첨가한 55% methanol, 그리고 cytokinin은 70% methanol을 이동상으로 사용하였고 각각 265 nm와 254 nm 파장에서 분석하였다(Karadeniz *et al.*, 2006). 균주의 모든 식물호르몬 생성능은 단백질 대비값(μ g/mg protein)으로 나타내었다.

토마토 뿌리신장 조사

균주가 에틸렌 생성을 억제하여 뿌리생장을 촉진하는 것을 조사하기 위해 에틸렌 생성 억제물질인 CoCl₂를 대조균으로 처리하여 실험을 진행하였다. 멸균된 Whatman No. 2 여과지가 깔린 멸균된 유리 페트리 접시에 70% 알코올로 5분간 소독한 토마토종자 20개씩을 놓은 후 균주(5×10^7 cells/ml) 6 ml와 2 μ M CoCl₂ 6 ml 그리고 멸균 증류수 6 ml를 각각 처리하였다. 6일 동안 30°C에서 암 조건으로 배양한 후에 발아된 토마토 유묘의 뿌리길이를 측정하였고, 결과는 Analysis of Variance (ANOVA, SYSTAT ver. 10, 2000, Systat Software, USA)를 이용하여 통계처리 하였다.

토마토의 소규모 토양재배 실험

선발균주가 토마토 식물의 가뭄 스트레스 극복을 돕는 것을 조사하기 위해 소규모 토양재배 실험을 진행하였다. 먼저 토양을 2 mm 체로 거른 후 토양과 시판되는 부산물 퇴비의 비율이 70:30이 되도록 혼합한 후 250 g씩을 직경 7.5 cm인 플라스틱 용기 3개에 각각 담았다. 뿌리길이가 1 cm 이하의 유사한 길이로 발아한 토마토 유묘 4개씩을 약 2 cm 깊이로 심고 7일간 plant growth chamber에서 광조건(12 h, 30°C, 6,000 lux)과 암조건(12 h, 24°C) 하에 2일에 한 번씩 증류수 20 ml를 공급하여 토양 수분보유능의 20%가 되게 하며 재배하였다. 균주는 LB 배지(Difco Lab)에서 배양(72 h, 30°C, 200 rpm) 후 원심분리(3000×g, 4°C, 20 min)를 통해 멸균 증류수로 세척하고, 토양 1 g 당 균주 10⁸ cell로 토마토 유묘에 처리하였다. 재배 7일 후에 전체 식물을 회수하여 뿌리길이, 줄기길이와 건조중량을 측정하였으며 결과는 ANOVA를 이용하여 통계처리 하였다.

결과 및 고찰

균주의 분리동정

갯솜바귀와 통보리사초 근권에서 각각 분리한 균주 BD3-35와 BD2-26, 맥문동 근권에서 분리한 균주 m-2와 m-4가 질소원이 없는 음성 대조군 배지에서 생장하지 않았으나 ACC를 유일 질소원으로 첨가한 실험군 배지에서 생장하였고, 질소원을 첨가한 양성 대조군 배지와 비교하여 대등하게 생장하였으므로 균주들이 ACC를 질소원으로 이용하여 배양되었다는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 각 균주들을 ACC deaminase 생성능이 있는 균주로 선별하였다. 이들의 16S rRNA 유전자 염기서열을 NCBI 등록 균주들과 비교한 결과, BD3-35는 *Pseudomonas brassicacearum* subsp. *neaurantiaca*와 100%, BD2-26은 *Pseudomonas thivervalensis*와 99.886%, m-2는 *Escherichia hermannii*와 98.579%, 그리고 m-4는 *Enterobacter asburiae*와 99.774%의 상동성을 나타내어 각각의 균주로 동정되었다. 그러나 정확한 종 수준까지의 동정을 위해서는 생화학적 특성과 DNA-DNA 혼성화 실험이 필요하다.

ACC deaminase와 식물호르몬 생성능 조사

각 균주들의 ACC deaminase 활성은 BD3-35 균주가 20.26 μM α -KB/mg protein/h로 가장 높았으며, BD2-26 균주는 6.31 μM /mg/h, m-4는 0.41 μM /mg/h, 그리고 m-2는 0.36 μM /mg/h로 가장 낮았다. BD3-35 균주의 효소 활성도는 우수활성 균주로 보고된 *Enterobacter cloacae* UW4의 21.23 μM α -KB/mg/h (Ma *et al.*, 2003)와 비교할 때 거의 유사하여 활성이 우수한 균주임을 알 수 있었다. 나머지 세 개의 균주도 Ma *et al.* (2003)의 13개 균주나 Belimov *et al.* (2009)이 보고한 10개 균주들의 0.22–10.2 μM α -KB/mg/h 수준과 비교하여 유사한 활성도 수준을 보였다.

ACC deaminase 생성능을 가진 4개의 균주들에 대해 전구물질 L-tryptophan을 3 mM 첨가하여 옥신 IAA와 IBA 생성을 측정했을 때 m-4 균주가 가장 높은 생성능을 나타냈는데 IAA는 배양 2일째에 763 μg /mg protein으로 최대 생성능을 보이며 IBA는 3일째 426 μg /mg으로 최대 생성능을 나타내었다(Fig. 1).

Acinetobacter rhizosphaerae BIHB723이 0.1% DL-tryptophan이 첨가된 NB 배지에서 2일째에 15.6 μg /ml를 생성하는 것 (Gulati *et al.*, 2009)과 비교하여 m-4 균주는 0.07% L-tryptophan이 첨가된 NB 배지에서 2일째에 88.87 μg /ml를 생성하였다. 전구물질 tryptophan의 첨가농도를 높일수록 균주에 의한 IAA 생성량도 증가하는 것이 보고되었는데(Ahmad *et al.*, 2008) m-4 균주는 더 낮은 농도의 tryptophan에서 더 많은 IAA 생성량을 보였으므로 옥신 생성능이 우수한 균주인 것을 알 수 있다.

식물호르몬 ABA는 일차적으로 종자의 성숙과 기공 닫힘을 조절함으로써 식물체가 받는 가뭄 스트레스에 저항한다. 균주들의 ABA 생성능을 조사한 결과 m-2 균주가 배양 4일째 1.83 μg /mg protein (0.32 μg /ml)의 생성능을 보였다. 이를 동일한 방법으로 ABA 생성능을 조사한 8개의 균주(Sgroy *et al.*, 2009)와 비교하면 *Bacillus subtilis*와 *Pseudomonas putida*의 1.8과 4.2 μg /ml 보다는 낮은 수준이지만 나머지 균주들의 0.2 μg /ml 이하의 생성능 보다는 높아 보통 이상의 ABA 생성능을 지닌 균주인 것을 알 수 있다. 나머지 3개 균주는 ABA 생성능을 나타내지 않았다. 또 다른 식물호르몬인 시토키닌은 세포분열을 촉진하고 엽록체의 발달과 노쇠 시작 지연 등에 관여하는데 BD2-26과 BD3-35 균주가 시토키닌을 생성하여 배양 1일째에 각각 14.94 μg /mg protein (3.54 μg /ml)과 15.61 μg /mg protein (3.61 μg /ml)의 생성능을 보였다. 이는 동일한 방법으로 조사한 8개 균주 중 *B. subtilis*와 *P. putida*가 각각 25.1 그리고 22.3 μg /ml를 생성하는 것에 비해서 낮지만 나머지 균주들의 2.0 μg /ml 이하의 생성능 (Sgroy *et al.*, 2009)과 Boiero 등(2007)이 높은 생성능을 지닌 균주로 제시한 USDA110의 2.5 μg /ml과 나머지 균주들이 0.75와 0.82 μg /ml를 생성하는 것을 비교하면 BD2-26 균주도 높은 시토키닌 생성능을 지닌 균주인 것을 알 수 있다.

토마토 뿌리신장 조사

ACC deaminase와 식물호르몬 생성능을 지닌 균주들을 대상으로 토마토 종자발아 시 뿌리신장을 조사하였다. 균주 m-2, m-4, BD2-26과 BD3-35는 발아된 토마토 유묘의 뿌리길이를 각각 유의성 있게 132, 171, 161과 102% 증가시켰는데, 이는 각 균주가 지니는 ACC deaminase 작용에 의한 에틸렌 억제능과 각 식물호르몬 작용에 따른 식물생장 촉진능이 영향을 준 것으로

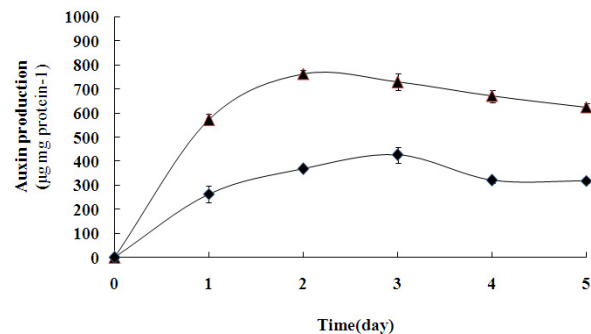


Fig. 1. Auxin production by *Enterobacter asburiae* m-4 in 3 mM L-tryptophan added nutrient broth medium (▲, IAA; ■, IBA).

보인다(Fig. 2). ACC deaminase에 의한 에틸렌 억제능이 뿌리 신장에 작용하는 것은 에틸렌 생성을 억제하는 CoCl_2 (Belimov *et al.*, 2009)를 처리한 토마토 유묘의 뿌리길이 대조군보다 26.8% 긴 것으로부터 알 수 있다. 그러나 균주들의 ACC deaminase의 활성과 뿌리신장의 정도는 일치하지 않았는데 종자발아와 세포분열 및 길이 생장에 다양한 식물호르몬이 작용할 뿐만 아니라 상호작용할 수 있으므로(Ahmad *et al.*, 2008) 이에 대해 더 많은 연구가 필요하다.

소규모 토양재배 실험

가뭄 조건 하의 소규모 토양재배 실험은 토양 수분보유능의 20% 조건에서 수행하였는데 10%인 경우 토마토가 자라지 못하고 모두 말라 죽었기 때문이다. 7일 재배 후 토마토 식물의 뿌리 길이는 m-4 균주가 대조군에 비해 유의성 있게 35% 증가시켜 유묘 뿌리신장 결과와 동일하게 균주들 중에서 가장 높았다(Fig. 3). 이는 m-4가 다른 균주에 비해 더 많이 생성하는 옥신의 뿌리 성장 촉진능과 더불어 ACC deaminase 활성이 가뭄 스트레스에 노출된 식물에 작용해 뿌리생장을 촉진한 것으로 보인다. 뿌리 신장은 식물이 토양 속 더 많은 수분을 탐색할 수 있도록 하기 때문에 가뭄 스트레스에 노출된 식물체에 이로운 점으로 작용할 것이다(Passioura, 1982). 균주 m-2와 BD3-35는 토마토 뿌리길이를 대조군 대비 각각 15%와 14% 증가시켰으므로 두 균주 또

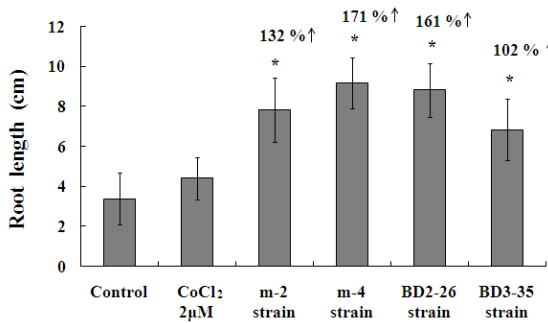


Fig. 2. Root length of germinated tomato seedlings after 6-day treatment of rhizobacterial strains (* $p < 0.05$).

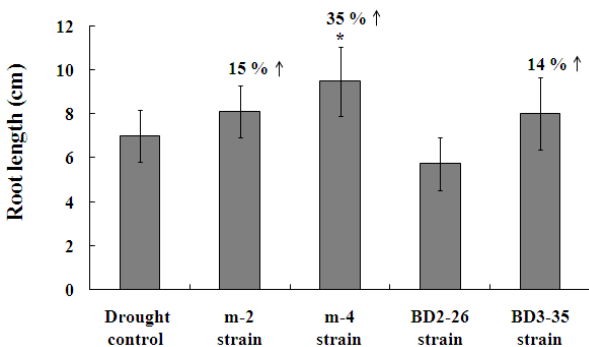


Fig. 3. Root length of 7-day grown tomato root after inoculation of rhizobacterial strains to 7-day old tomato seedlings (* $p < 0.05$).

한 식물의 가뭄 스트레스 극복을 돕는데 도움을 줄 것이 예상된다(Fig. 3). 뿌리와는 대조적으로 모든 균주들이 토마토의 줄기 길이를 증가시키지는 못하였으며 수분 결핍 대조군과 유사한 결과를 나타내었다. 이는 가뭄 스트레스를 받는 식물에서 토양 내 수분을 탐색하기 위해 줄기와 뿌리생장 비에서 뿌리의 성장비율이 높아지는 경향을 보이며(Passioura, 1982) 여기에 균주에 의한 뿌리생장까지 촉진되기 때문인 것으로 추정된다.

토마토 식물의 건조중량은 BD3-35 균주가 유의성 있게 대조군 대비 68% 증가시켰는데(Fig. 4) 이는 이 균주가 ACC deaminase 활성이 가장 높을 뿐만 아니라 식물의 세포 분열을 촉진하는 시토키린 생성능을 가졌기 때문에 생장이 활발하게 일어나는 유묘 상태의 토마토에 작용해 세포분열을 더욱 촉진시켜 건조중량이 증가한 것으로 보인다. 한편 시토키린 생성능이 있는 BD2-26 균주와 ABA 생성능이 있는 m-2 균주는 건조중량을 대조군 대비 각각 33%와 22% 증가시켰는데(Fig. 4) 실험 개체수를 증가시키면 통계적 유의성이 나타날 것으로 기대되며 이들 균주 또한 식물체가 가뭄 스트레스를 극복하고 성장하는데 도움을 줄 것이 예상된다.

본 연구를 통해 ACC deaminase와 식물호르몬 생성능을 지닌 분리균주 m-2, m-4, BD2-26와 BD3-35가 가뭄 스트레스에 노출된 식물체의 성장을 촉진하는데 작용하는 것을 알 수 있었다. 실제 수분 결핍 환경에서의 후속연구를 통해 건조한 지역에 있는 작물이나 나대지 식물에 미생물 비료 등으로 활용 시 식물생장을 지속시킬 수 있을 것으로 예상된다.

적요

일부 근권세균은 ACC deaminase를 생성하여 식물의 성장을 저해하고 노화를 촉진시키는 식물호르몬 에틸렌의 수준을 낮춤으로써 스트레스 조건 하의 식물의 성장을 지속시킨다. 본 연구에서는 모래사장에서 자라는 식물의 근권에서 ACC deaminase를 생성하는 세균 균주들을 분리하여 16S rDNA 염기서열 분석을 통해 *Escherichia hermannii* m-2, *Enterobacter asburiae* m-4, *Pseudomonas thivervalensis* BD2-26, and *Pseudomonas brassicacearum* subsp. *neoaurantiaca* BD3-35로 동정하였다. BD3-35 균주는 이들 중 가장 높은 ACC deaminase 활성, 20.26 α -ketobutyrate $\mu\text{M}/\text{mg protein/h}$ 을 나타내었다. 균주 BD3-35와

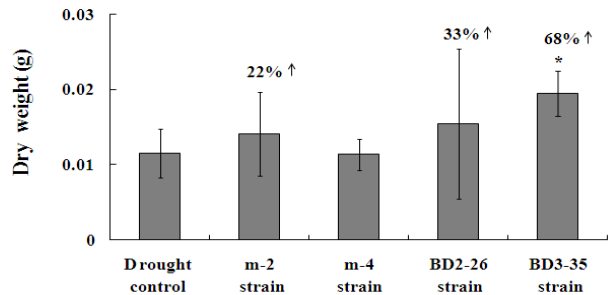


Fig. 4. Dry weight of 7-day grown tomato plant after inoculation of rhizobacterial strains to 7-day old tomato seedlings (* $p < 0.05$).

BD2-26는 식물호르몬 시토키닌, m-4는 옥신 IAA와 IBA, 그리고 균주 m-2는 ABA 생성능을 가졌다. 이 균주들은 모두 토마토 종자 발아 시 유묘의 뿌리신장을 유의성 있게 촉진하였다. 또한 7일간 자란 토마토 식물에 처리하고 가뭄 스트레스 하에서 7일간 재배하였을 때 비접종 대조군에 비해 균주 BD3-35, m-2와 m-4는 토마토 뿌리의 길이를 각각 14, 15와 35% 증가시켰으며, m-2, BD2-26와 BD3-35는 토마토 식물의 건조중량을 각각 22, 33과 68% 증가시켰다. 따라서 이 균주들은 가뭄 스트레스 하의 식물을 위한 미생물 비료로 사용될 수 있는 가능성을 보였다.

감사의 말

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project의 수생태복원사업 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Abeles, A.L. and Abeles, F.B. 1972. Biochemical pathway of stress-induced ethylene. *Plant Physiol.* **50**, 496-498.
- Ahmad, F., Ahmad, I., and Khan, M. 2008. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiol. Res.* **163**, 173-181.
- Belimov, A.A., Dodd, I.C., Hontzeas, N., Theobald, J.C., Safronov, V.I., and Davies, W.J. 2009. Rhizosphere bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase increase yield of plants grown in drying soil via both local and systemic hormone signalling. *New Phytol.* **181**, 413-423.
- Boiero, L., Perrig, D., Masciarelli, O., Penna, C., Cassan, F., and Luna, V. 2007. Phytohormone production by three strains of *Bradyrhizobium japonicum* and possible physiological and technological implications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **74**, 874-880.
- Glick, B.R. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Can. J. Microbiol.* **41**, 109-117.
- Glick, B.R., Penrose, D.M., and Li, J. 1998. A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *J. Theor. Biol.* **190**, 63-68.
- Glickmann, E. and Dessaux, Y. 1995. A critical examination of the specificity of the Salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* **61**, 793-796.
- Govindasamy, V., Senthilkumar, M., Mageshwaran, V., and Annapurna, K. 2009. Detection and characterization of ACC deaminase in plant growth promoting rhizobacteria. *J. Plant Biochem. Biotechnol.* **18**, 71-76.
- Grichko, V.P., Filby, B., and Glick, B.R. 2000. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb, and Zn. *J. Biotechnol.* **81**, 45-53.
- Grichko, V.P. and Glick, B.R. 2001. Amelioration of flooding stress by ACC deaminase-containing plant growth-promoting bacteria. *Plant Physiol. Biochem.* **39**, 11-17.
- Gulati, A., Vyas, P., and Rahi, P. 2009. Plant growth-promoting and rhizosphere-competent *Acinetobacter rhizosphaerae* strain BIHB-723 from the cold deserts of the Himalayas. *Cur. Microbiol.* **58**, 371-377.
- Karadeniz, A., Topcuoglu, S.F., and İnan, S. 2006. Auxin, gibberellin, cytokinin and abscisic acid production in some bacteria. *World J. Microbiol. Biotechnol.* **22**, 1061-1064.
- Ma, W., Sebastianova, S.B., Sebastian, J., Burd, G.I., Guinel, F.C., and Glick, B.R. 2003. Prevalence of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase in *Rhizobium* spp. *Antonie van Leeuwen.* **83**, 285-291.
- Mayak, S., Tirosha, T., and Glick, B.R. 2004. Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Physiol. Biochem.* **166**, 525-530.
- Morgan, P.W. and Drew, M.C. 1997. Ethylene and plant response to stress. *Physiol. Plantarum* **100**, 620-630.
- Passioura, J.B. 1982. Roots and drought resistance. *Agri. Water Manag.* **7**, 265-280.
- Penrose, D.M. and Glick, B.R. 2003. Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria. *Physiol. Plantarum* **118**, 10-15.
- Sgroy, V., Cassan, F., Masciarelli, O., Papa, M., Lagares, A., and Luna, V. 2009. Isolation and characterization of endophytic plant growth-promoting (PGPB) or stress homeostasis-regulating (PSHB) bacteria associated to the halophyte *Prosopis strombulifera*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **85**, 371-381.
- Sung, M., Han, S., and Kwon, N. 2012. World Grain Market. Korean Rural Economic Institute Report 11-2012-04. pp. 27-34.