

사과 바이러스와 바이로이드 감염이 '홍로' 사과의 수체 및 과실 특성에 미치는 영향

조상윤^{1*}, 김현란², 조강희³, 김세희¹, 윤병현¹, 오세원⁴, 전지혜⁵

¹국립원예특작과학원 과수기초기반과, 연구사, ²연구관, ⁴박사후연구원, ³농촌진흥청 연구정책국, 연구관, ⁵온난화대응농업연구소, 연구관

The Effects of Virus and Viroid Infections on the Growth and Fruit Quality of 'Hongro' Apples

Sang-Yun Cho^{1*}, Hyun Ran Kim², Kang Hee Cho³, Se Hee Kim¹, Byeonghyeon Yun¹, Sewon Oh⁴ and Ji Hae Jun⁵

¹Researcher, ²Senior Researcher and ⁴Post-doctoral Researcher, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Fruit Foundation Division, Wanju 55365, Korea

³Senior Researcher, Research Policy Bureau, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

⁵Senior Researcher, Research Institute of Climate Change and Agriculture, Jeju 63240, Korea

Abstract - This study was undertaken to elucidate the effects of virus and viroid infections on the growth of trees and the attributes of fruit quality in 'Hongro' apples. Trials were initiated using virus-infected, viroid-infected, combined virus/viroid-infected, and uninfected apple trees in an experimental apple orchard at the National Institute of Horticultural and Herbal Science in 2019. The growth of each tree was measured annually and compared between virus-free and virus/viroid-infected trees. Fruits were harvested from all apple trees, and selected attributes of fruit quality, including yield, weight, firmness, titratable acidity, and anthocyanin content, were determined in September 2021-2022. The results revealed significant differences among virus-free trees and those infected with either virus, viroid, or a combination of virus and viroid. Infection with viral and viroid diseases led to reductions in tree height (14.0%), trunk area (23.1%), fruit yield (65.0%), fruit weight (34.4%), and anthocyanin content (39.8%), while increasing fruit firmness (33.2%) and titratable acidity (39.8%), respectively. We anticipate that our research findings will also be beneficial for apple virus and viroid disease control, as well as apple cultivation management.

Key words - Apple 'Hongro', Fruit quality, Tree growth, Viroid, Virus

서 언

사과(*Malus domestica*)는 장미과(Rosaceae) 사과나무속(*Malus*)에 속하고 전세계적으로 재배되어 경제적으로 중요한 작물 중 하나이다. 국내 사과 재배 면적은 34,644 ha이며, 생산량은 약 566,041 톤으로 재배된 과수 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다(Korean Statistical Information Service, 2022). 사과 나무는 총 21종의 바이러스와 8종의 바이로이드 감염이 보

고되었고(Umer *et al.*, 2019), 나무의 생육 저하, 조기 낙과, 과실 수량 감소, 품질 저하 등으로 많은 경제적 피해를 야기하고 있다(Baumann and Bonn, 1988; Cambell, 1963; Posnette *et al.*, 1963; Wood, 1978; van Oosten *et al.*, 1982).

과수는 대부분 접목 및 삽목을 통한 영양번식으로 바이러스와 바이로이드가 감염된 나무를 이용해 증식하면 세대간의 전염이 이어지고 즙액, 전정 도구, 매개 곤충 등으로 건전체에 2차 전염된다(Kim *et al.*, 2006; Sutic *et al.*, 1999). 또한, 바이러스와 바이로이드 감염으로 인해 접목 성공률이 낮아지며, 이러한 현상은 눈(bud) 생존률 감소(최대 68%)에 의한 것으로 보고되었

*교신저자: E-mail chosy80@korea.kr

Tel. +82-63-238-6712

다(Baumann and Bonn, 1988).

국내 사과의 주요 바이러스 및 바이로이드병은 사과황화잎 반점바이러스(Apple chlorotic leaf spot virus, ACLSV), 사과 줄기홈바이러스(Apple stem pitting virus, ASPV), 사과줄기 그루빙바이러스(Apple stem grooving virus, ASGV), 사과모자이크바이러스(Apple mosaic virus, ApMV), 사과과피얼룩바이로이드(Apple scar skin viroid, ASSVd) 등이며, 최근 사과과 저모자이크바이러스(Apple necrotic mosaic virus), 사과해머헤드바이로이드(가칭, Apple hammerhead viroid) 등의 신규 바이러스, 바이로이드 감염이 보고되고 있다(Cho *et al.*, 2017; Lim *et al.*, 2019). 국내 사과 재배 농가에서는 주요 바이러스 및 바이로이드에 대한 감염률이 97.3%로 나타나며, 이 중에서는 ASGV가 94.4%로 가장 높은 감염률을 보였다(ASGV 93.4% > ASPV, 85.7% > ACLSV 59% > ASSVd 6.7% > ApMV 3.6%)(Lee *et al.*, 2020). 최근 중국에서는 배 과원의 바이러스 감염 정도를 조사한 결과, ASGV가 91.2%의 시료에서 감염된 것을 확인하였고, 79.5%의 시료에서 2종 이상의 바이러스 복합 감염이 확인되었다(Ma *et al.*, 2021).

ApMV와 ASSVd는 감염원의 계통, 과수 품종, 환경에 따라 차이는 있지만 일반적으로 잎과 과피 등에 뚜렷한 증상을 확인할 수 있어 감염 여부를 판단하기 용이하다(Hadidi *et al.*, 2017b; Hashimoto and Koganezawa, 1987; Nemeth *et al.*, 1986). 그러나 국내 사과 과원의 주요 감염원인 ACLSV, ASPV, ASGV는 감수성 품종에서는 어린 잎의 말림이나 줄기의 그루빙 증상이 나타날 수 있지만(Brunt *et al.*, 1996) 보편적으로는 가시적인 감염 증상이나 단기적인 피해를 유발하지 않는 대표적인 잠복 감염 바이러스병이다(Agrios, 1997; Loanna *et al.*, 2017). 이러한 바이러스의 특성상 농업인은 10~20년 이상의 사과 재배 기간 동안 바이러스 감염으로 인해 야기될 수 있는 수세 약화, 수량 감소, 과실 품질 저하 등을 바이러스병의 피해로 파악하기 어려울 수 있다.

사과 '홍로' 품종은 1980년부터 농촌진흥청 원예연구소에서 Spur Earliblaze에 Spur Golden Delicious를 교배하여 최종 선발(1988)한 대표적인 추석 사과이다. 현재 '홍로' 재배면적은 신 품종 '아리수', '감홍' 등의 재배면적 증가로 2018년 이후 감소 추세를 보이고 있다. 그러나 아직까지 후기 계열에 이어 국내에서 가장 많은 재배면적 비중을 차지하고 있으며, 2022년 12월 기준으로 14.1% 비중을 보유하고 있는 품종이다(Korea Rural Economic Institute, 2023).

사과 바이러스 및 바이로이드 감염에 의한 피해 영향 평가는

국외에서는 1970년대부터 수체 생장과 수량 감소 등이 보고되었다(Baumann and Bonn, 1988; Meijnske *et al.*, 1975; Wood, 1978). 국내는 1990년대부터 관련 연구를 시작하여 '홍로' 사과의 ACLSV 감염 영향 등 일부 품종 및 바이러스 대상으로 분석하였다(Kim *et al.*, 2004). 그러므로 본 연구에서는 '홍로' 사과 무병묘와 5종의 바이러스, 바이로이드 단일 및 복합 감염묘 분석을 위한 시험포장을 조성하여 동일 환경 조건에서 수체 및 과실의 피해 정도를 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

시험 재료의 구성 및 관리

2017년부터 2018년까지 사과 재배 농가 나무의 신초에서 시료를 채취하여 바이러스 감염 여부를 조사하였다(자료 미제시). 이 결과를 기반으로 무병묘(virus-free, VF) 및 바이러스와 바이로이드 단독 또는 복합 감염된 나무의 접수를 확보하여 약 100여주의 접목묘(무병 대목 M9 T337)를 양성하였다. 양성한 접목묘는 2019년 국립원예특작과학원 본원(전북 완주군 이서면) 과수와 시험포장에 3주씩 3반복 이상 분산 배치하여 재식하였다(4.0×2.0 m, 세장방추형). 시험구는 무병묘(VF), 바이러스 단독(ASGV), 바이러스 복합(ASGV+ASPV, ACLSV+ASPV+ASGV), 바이로이드 단독(ASSVd), 바이러스·바이로이드 복합(ASGV+ASPV+ASSVd, ACLSV+ASPV+ASGV+ASSVd)의 7개 그룹으로 구성되었다. 인접한 시험수 간의 교차 감염을 방지하기 위해 각 나무마다 개별적으로 적과 및 전정 도구 등은 나무마다 개별 사용하고 관리하였다. 또한 과실의 자연스러운 착색 정도를 평가하기 위해 착색제나 반사필름과 같은 인위적인 착색 유도 등의 처리를 하지 않았다.

바이러스, 바이로이드 진단

사과나무의 꽃, 꽃받침 등의 화기조직 및 발아 신초(나무당 5~10점)에서 식물 전체 RNA를 추출하기 위하여 Plant RNA mini kit (Onsol, Korea)를 사용하였다. 사과 바이러스·바이로이드 진단은 국립종자원 종자검사요령 과수 '포장검사' 대상 기준에 따라 5종의 바이러스 및 바이로이드(ACLSV, ASPV, ASGV, ApMV, ASSVd)의 감염여부를 다중 진단 키트인 P CHEK™ virus/viroid detection kit (Nexbio, Korea)의 매뉴얼에 따라 One-step RT-PCR 방법으로 수행하였다.

수체 조사

수체 조사는 생장이 정지한 10월 하순에 수행되었으며 수고(지면으로부터 원줄기 정단 신초 끝까지의 길이), 수폭(나무의 폭 직경), 주간직경(접목 부위 약 10 cm 위)을 측정하였다. 수고와 수폭은 유묘기인 재식 3년차(2019년~2021년)까지 측정하였고 수고가 4 m 이상 도달한 재식 4년차부터는 전정으로 수고와 수폭을 제한 관리하여 측정하지 않았다.

과실 특성 조사

과실 조사는 재식 3년차인 2021년과 4년차인 2022년 두차례 수행되었다. 재식 5년차인 2023년은 과원 전체에 탄저병이 발병하여 과실을 수확하지 못하였다. 조사는 시험구별 3주의 나무에서 평균 과중 과실 30개(나무당 10개)를 분석하였다. 수확 한 달 전 착과수를 조사하고 9월 초순(2021년 9월 1일, 2022년 9월 2일)에 무병묘와 감염묘의 과실을 같은 날 모두 수확하였다. 수량은 착과수에 평균 과중을 곱하여 도출하였으며, 과피 특성 및 외형 조사는 농촌진흥청 사과 유전자원 특성조사 매뉴얼을 참고하여 수행하였다. 과피의 착색지수는 색차계(CR-400, Konica Minolta, Japan)를 이용하여 착색부위와 미착색부위의 Hunter L, a, b 값을 측정하고 평균 값으로 나타내었다. 또한 굴절당도계(PAL-1, Atago, Japan), 경도계(FR-5129, Lutron, Taiwan), 자동적정기(TitroLine 5000, SI Analytics, Germany)를 활용하여 과일의 당도, 경도 그리고 산도를 측정하였다(Oh *et al.*, 2023). 안토시아닌 함량 분석은 1개의 사과 과피에서 지름 1 cm 크기의 시료를 10개씩 채취하고 용액(MeOH, HCl)에 16시간 침지하여 침출액을 가시광선분광광도계(Shimadzu, UV-2700,

Japan) 530 nm 파장에서 측정하여 분석하였다(Siegelman and Hendricks, 1958).

통계 분석

수체 조사 결과는 시험구별 5주씩, 과실은 시험구별 10개의 과실을 1반복으로 하여 총 3반복 30개의 과실을 분석하여 얻은 결과로, 이를 이용하여 평균과 표준편차를 계산하였다. 통계 분석은 IBM SPSS statistics 소프트웨어(version 26, Armonk, NY)를 사용하여 일원배치분산분석(ANOVA)을 수행하였다. 평균 간 유의차는 95% 신뢰 수준에서 Duncan's multiple range test를 활용하여 0.05% 수준에서 유의성을 검증하였다.

결과 및 고찰

바이러스, 바이로이드 감염에 의한 수체 영향

바이러스와 바이로이드 감염에 따른 나무의 영양생장 영향을 확인하기 위하여 매년 수고, 수폭 및 주간직경을 측정하고 분석하였다. 재식 1년차(2019년) 바이러스 1종~3종 감염묘의 평균 수고는 224 cm, 227 cm, 234 cm로 바이러스 감염의 3개 시험구(ASGV, ASPV+ASGV, ACLSV+ASPV+ASGV)간 수고 차이는 거의 없지만 무병묘(244 cm)에 비해 수고가 평균 16 cm (7%) 감소하였다(Table 1). 바이로이드 단일(ASSVd) 및 바이러스·바이로이드 복합 감염(ASGV+ASPV+ASSVd, ACLSV+ASPV+ASGV+ASSVd) 시험구의 평균 수고는 201 cm, 207 cm, 221 cm로 무병묘에 비해 수고가 평균 34 cm (14%) 감소하였다. 재식 2년차(2020년)는 1년차와 경향치는 비슷하나 ASGV 감염주의 수고

Table 1. Effects of virus and viroid infections on tree height and width.

Test group	Tree height (cm)			Tree width (cm)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
VF	244±9.6 ^z a ^y	359±7.4 a	402±16.4 a	150±22.3 a	188±14.8 a	198±8.4 a
ASGV	224±24.9 abc	312±23.9 b	381±21.3 ab	143±32.3 ab	164±20.7 b	184±11.4 a
ASPV+ASGV	227±21.4 abc	326±40.8 ab	388±21.7 a	144±15.2 ab	152±17.9 bc	182±17.9 a
ACLSV+ASPV+ASGV	234±15.2 ab	333±19.9 ab	384±20.7 ab	135±18.7 ab	164±11.4 b	188±16.4 a
ASSVd	210±23.7 bc	310±34.6 b	366±48.8 ab	121±14.3 b	136±16.7 cd	154±18.2 b
ASSVd+ ASPV+ASGV	207±15.7 bc	311±28.8 b	366±20.7 ab	120±12.2 b	142±9.1 cd	158±8.4 b
ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV	221±22.3 c	318±33.7 b	376±28.5 b	117±9.7 b	130±10.0 d	144±11.4 b

^zResults are presented as the mean ± standard deviation for 5 trees in each group.

^yValues with different alphabet letters (a-d) indicate significantly differences at p<0.05 according to Duncan's multiple range test.

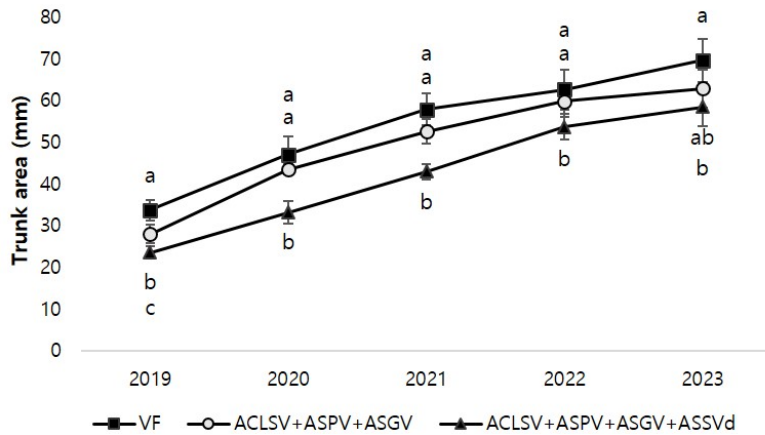


Fig. 1. Effect of apple virus and viroid infection on trunk as annual averages for 2019~2023. Each means represents the average of 5 replicates. Means sharing the same superscripts within a column are not significantly different at 5% probability level. VF: virus-free, ACLSV (Apple chlorotic leaf spot virus), ASPV (Apple stem pitting virus), ASGV (Apple stem grooving virus), ASSVd (Apple scar skin viroid).

(312 cm)가 바이로이드 감염주 수고(310~318 cm)와 비슷하였다. 재식 3년차(2021년)에서도 그룹별 수고의 경향치는 전년도와 비슷하게 나타났으며, 무병묘의 수고는 402 cm, 바이러스 3종 복합 감염묘 384 cm, 바이러스·바이로이드 4종 복합 감염묘 350 cm로 무병묘 대비 감염묘의 수고는 최대 36 cm (9%) 감소하였다. 3년간 시험구별 수고를 조사한 결과, 바이러스 및 바이로이드 감염은 무병묘에 비해 수고가 감소되는 영향을 확인하였고 특히 바이로이드 단일 및 바이러스와 복합 감염된 나무에서 더 많은 수고 감소량(최대 14%)을 확인할 수 있었다.

수폭 또한 수고의 측정치와 비슷한 양상을 보였고, 바이러스 감염 시험구간 바이러스, 바이로이드 단일 및 복합 감염 시험구간 유의차는 없었다. 재식 1년차 무병묘의 수폭은 150 cm이고, 바이러스 시험구는 평균 140.7 cm, 바이러스·바이로이드 시험구는 119.3 cm으로 무병묘 대비 9.7%, 20.5%의 수폭이 감소하였다. 재식 3년차 수폭은 무병묘와 바이러스 감염 시험구간은 유의차가 없었고 바이러스·바이로이드 시험구는 무병묘 대비 평균 23.5%의 수폭이 감소하였다.

재식 후 2년차부터 4년차까지 주간직경은 무병묘와 바이러스 감염묘 시험구간의 유의차는 없었으나 바이러스, 바이로이드 4종 복합 감염 시험구는 무병묘와 유의차가 있었다(Fig. 1). 재식 1년차 무병묘의 주간직경은 33.82 mm, 바이러스 3종 감염 나무는 28.16 mm, 4종 복합 감염묘는 23.72 mm로 감염 시험구는 무병묘 대비 16.7%, 29.9% 감소하였다. 바이러스 3종 감염 시험구의 주간직경은 재식 2년차~4년차는 무병묘와 유의차는 없었고 5년차에는 무병묘보다 9.7% 감소하였다. 바이로이드 포함 4

종 복합 감염 시험구는 5년차까지 무병묘와 주간직경의 유의차가 있었으며 평균 23.1% 감소하였다.

최근의 연구에서는 사과바이로이드(ASSVd) 감염으로 인해 사과 'Odyssey' 유묘의 잎에서 chlorophyll 합성에 관련된 무기질 함량이 무병묘 대비 감소하였으며, 이로 인해 광합성 효율이 감소하여 수고, 주간 직경, 가지 길이 감소 등에 영향을 미친 것으로 보고되었다(Li *et al.*, 2023). 또한, ASSVd 감염묘 앞에서는 이소플라보노이드 생합성 및 탄수화물과 아미노산 대사 관련 인자들의 발현양도 크게 감소하였다. 그러므로 사과 바이로이드 감염에 의한 수고, 수폭, 주간 직경 감소는 사과 나무에 생리학적 부분과 물질 대사 과정에 영향을 주어 영양생장에 피해가 나타난 것으로 추측한다.

바이러스, 바이로이드 감염에 의해 과실에 나타나는 증상

과실에 나타나는 외형 및 증상은 과피 착색정도(전면 80% 이상/이하), 동녹, 비대칭, 과점 크기, 얼룩무늬, 소과(200 g 미만) 등을 육안으로 관찰하였다. Fig. 2A의 과실을 시험구별로 비교한 결과에 따르면 무병묘 대비 감염묘의 과실은 크기가 작아지고 착색 불량이 가장 두드러지게 나타났다. 바이러스 감염묘의 대표적인 과실 특징은 과점이 커지고 도드라지며 과피 왁스가 누출되는 과숙 현상, 동녹, 좌우 비대칭(Fig. 2B) 등이 있었다. 바이러스·바이로이드 복합 감염묘의 과실은 주로 과피의 얼룩무늬(Fig. 2C), 심한 동녹, 착색 불량, 소과(Fig. 2D) 등을 나타내었다. 바이러스 감염묘의 모든 과실이 동일한 영향이 있는 것은 아니지만(주당 최대 70% 영향, data not shown), 바이로이



Fig. 2. Effect of apple virus and viroid on fruit of virus-free, virus and viroid-infected apple 'Hongro'(A). Comparison of virus-free (left) and 3 viruses (B), viroid (C), and 3 viruses and viroid infected (right) apples. VF: virus-free, ASGV (Apple stem grooving virus), ASPV (Apple stem pitting virus), ACLSV (Apple chlorotic leaf spot virus), ASSVd (Apple scar skin viroid).

드 단일 및 바이러스와 바이로이드 복합 감염모에서는 모든 과실에서 동록, 과피 얼룩, 과중 감소 등의 증상이 나타났다.

바이로이드는 단백질을 암호화하지 않는 환상형의 짧은 RNA로만 이루어져 있고(Flores *et al.*, 2015; Hashimoto and Koganezawa, 1987) 자신의 핵산을 복제하기 위하여 기주 단백질에 강하게 결합하여(López-Carrasco and Flores, 2017) 효소와 인자들을 활용하며 이로 인하여 바이러스보다 기주에 따라 더 많은 영향과 피해를 야기하기도 한다. 그러나 때로는 바이로이드 감염이 잠복 증상이거나 증상이 전혀 없는 경우도 있으며, 포도의 경우 바이로이드(Grapevine yellow speckle viroid 1 and 2) 단독 감염에서는 무증상이다가 바이러스(Grapevine fanleaf virus)와 복합 감염되면 엽맥 황화 등의 증상을 야기하는 경우도 있다(Hadidi *et al.*, 2017a; Hammond, 2017; Szychowski *et al.*, 1995; Verhoeven *et al.*, 2017). 본 연구에서 다른 바이러스와 바이로이드는 '홍로' 품종에서 잎의 증상을 야기하지는 않았지만 Fig. 2의 결과에서처럼 과실에서는 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 이러한 영향은 바이로이드 단독 보다는 바이러스와 바이로이드 복합 감염 과실에서 기형과가 더 많이 나타났다. 이로써 바이러스와 바이로이드의 복합 감염에 의한 과실의 피해가 더 큰 것으로 판단된다.

바이러스, 바이로이드 감염에 의한 과실 수량 영향

바이러스와 바이로이드의 단일 및 복합 감염에 의한 과실 수량 영향을 확인하기 위해 연 수확 한달 전 시험구별 착과수를 조

사하고 분석하였다. Fig. 3의 결과에 따르면 2021년 재식 3년차 무병묘의 평균 착과수는 71.8개이며, 바이러스 감염묘는 33.2 (ASGV), 48.0 (ASPV+ASGV), 68.2 (ACLSV+ASPV+ASGV)개로 나타났다. 이에 따라 무병묘 대비 감염묘의 착과수는 최대 54.0% 감소하였다. 바이로이드 단일 및 바이러스와 바이로이드 복합 감염묘의 착과수는 평균 49.4 (ASSVd), 48.4 (ASSVd+ASPV+ASGV), 34.6 (ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV)개로 나타났으며, 무병묘 대비 최대 51.8% 감소하였다. 수량은 평균 과중(Table 2)에 착과수를 곱하여 산출하여 무병묘는 주당 평균 22.3 kg, 바이러스 감염묘는 6.6 (ASGV), 13.7 (ASPV+ASGV), 14.6 (ACLSV+ASPV+ASGV) kg으로 나타났다. 따라서 바이러스 감염묘는 무병묘 대비 수량이 최대 70.4% 감소한 것을 확인하였다. 바이러스와 바이로이드 복합 감염묘의 주당 수량 평균은 8.4 (ASSVd), 8.7 (ASSVd+ASPV+ASGV), 5.2 (ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV) kg으로 나타났으며, 무병묘 대비 최대 76.7% 감소하였다.

2022년 재식 4년차 무병묘 과실의 착과수 평균은 107.3개이고 바이러스 감염묘의 과실은 71.7 (ASGV), 110.7 (ASPV+ASGV), 87.7 (ACLSV+ASPV+ASGV)개로 무병묘와 비슷하거나 최대 33.2% 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 3). 바이러스와 바이로이드 복합 감염묘 과실은 주당 64.0 (ASSVd), 80.7 (ASSVd+ASPV+ASGV), 77.0 (ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV)개로 무병묘 대비 착과수는 최대 40.4% 감소하였다. 수량은 무병묘 43.5 kg, 바이러스 감염주는 21.4~28.1 kg으로 최대 50.8% 감소

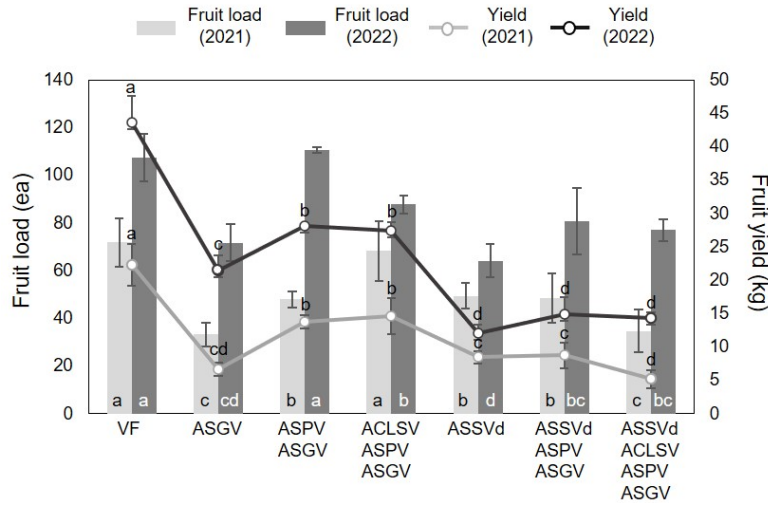


Fig. 3. Effect of apple virus and viroid on fruit load and yield of ‘Hongro’ apple tree. Error bars represent the standard deviations from triplicate experiments. Means with different letters are significantly different ($p < 0.05$) according to Duncan’s multiple range tests. VT: virus-free, ASGV (Apple stem grooving virus), ASPV (Apple stem pitting virus), ACLSV (Apple chlorotic leaf spot virus), ASSVd (Apple scar skin viroid).

Table 2. Comparison of fruit weight, firmness, soluble sugar content, and acidity of fresh apples from trees infected and non-infected with apple virus and viroid.

Test group	Year of harvesting	Fruit weight (g)	Firmness (N/Ø 8 mm)	Soluble sugar content (°Brix)	Acidity (%)
VF		310.3±28.32 ^z a ^y	42.5±2.91 cd	14.6±0.36 c	0.22±0.01 cd
ASGV		199.6±26.33 d	46.1±2.77 c	17.3±1.77 a	0.23±0.01 c
ASPV+ASGV		285.5±18.92 b	39.6±3.34 d	15.5±0.81 b	0.21±0.01 cd
ACLSV+ASPV+ASGV	2021	213.8±18.45 c	42.5±3.69 cd	15.7±1.02 b	0.23±0.02 c
ASSVd		170.7±19.02 e	63.0±3.43 a	14.3±0.23 c	0.36±0.02 a
ASSVd+ ASPV+ASGV		179.6±17.85 e	58.0±6.47 b	13.8±0.40 c	0.30±0.02 b
ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV		149.1±16.96 f	62.6±3.77 a	14.1±0.49 c	0.32±0.02 b
VF		405.7±33.14 a	38.7±3.40 b	16.72±0.35 a	0.30±0.10 cd
ASGV		299.2±20.83 b	38.5±4.53 b	16.65±0.55 a	0.29±0.08 cd
ASPV+ASGV		253.8±21.56 c	38.0±2.88 b	16.45±0.83 a	0.21±0.07 d
ACLSV+ASPV+ASGV	2022	313.0±38.61 b	39.1±4.12 b	16.02±0.41 a	0.26±0.06 cd
ASSVd		188.2±17.72 d	63.6±2.44 a	14.35±0.80 c	0.41±0.12 a
ASSVd+ ASPV+ASGV		184.2±17.23 d	60.5±3.11 a	15.03±0.39 b	0.40±0.05 ab
ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV		184.0±16.04 d	64.8±4.89 a	15.25±0.53 b	0.40±0.02 ab

^zResults are presented as the mean ± standard deviation for 30 apples in each group.

^yValues with different alphabet letters (a-d) indicate significant differences at $p < 0.05$ according to Duncan’s multiple range test.

하였고, 바이러스와 바이로이드 감염묘 수량 평균은 12.0~14.2 kg으로 무병묘 대비 최대 72.4% 감소하였다. 일반적으로 나무의 착과수가 많을수록 과실이 작고 신초 생

장량이 증가한다. 재식3년차 무병묘와 바이러스3종 복합 감염주는 착과량에서는 거의 차이가 없으나(71.8개, 68.2개) 수량으로 변환하면 22.3 kg, 14.6 kg으로 감염묘의 주당 과실 수량이

34.5% 감소함을 확인할 수 있었다. 재식4년차 조사에서 바이러스 2종 감염묘(ASPV+ASGV)의 과실 착과량은 무병묘보다 9.7%인 3.4개가 더 많지만 수량에서 무병묘 대비 35.4% (15.4 kg) 감소하였다. 그러므로 바이러스 감염 과실은 무병묘와 착과량은 비슷하더라도 과중 감소로 전체 나무의 과실 수량도 감소에 영향이 있음을 확인하였다.

사과에서 감염으로 인해 과실의 수량 감소를 야기하는 대표적인 바이러스는 사과모자이크바이러스(ApMV)이다. ApMV 감염은 바이러스의 계통과 품종에 따라 최대 30%의 수량 감소를 일으키고 잠복바이러스(ACLSV, ASPV, ASGV)와 함께 4종의 바이러스가 복합 감염된 나무에서는 최대 23.4 tons/ha의 과실 수량감소를 확인하였다(Chamberlain *et al.*, 1971; Sampson and Johnson, 1974; Schmidt, 1972; Wood, 1974). 본 연구에서는 ApMV 감염묘는 확보하지 못하였지만 잠복바이러스인 ACLSV, ASPV, ASGV 감염으로도 '홍로' 사과의 수량이 35%정도 감소함을 확인하였다. 3종의 잠복바이러스가 감염된 나무에 ApMV가 추가 감염되어 4종 이상의 바이러스가 복합 감염된 경우, 바이로이드 감염에 의한 영향과 유사한 수량 감소가 예상된다.

과실 특성조사

무병묘와 바이러스·바이로이드 감염묘 과실의 품질을 비교하기 위하여 수확한 과실의 과중, 경도, 당도, 산도, 과피 안토시아닌 함량을 측정하였다. 2021년 조사 결과, 과실의 평균 과중은 무병묘가 310.3 g, 바이러스 3종 감염이 213.8 g, 바이러스·바이로이드 4종 복합 감염 149.1 g으로 나타났다(Table 2). 따라서 무병묘 과실 대비 감염묘 과실의 과중이 각각 31.1%, 51.9% 감소함을 확인하였다. 과실의 산도는 무병묘와 바이러스 감염 과실에서는 큰 차이가 없었지만, 바이로이드 단독 및 복합 감염 과실의 산도는 높게 측정되었다(최대 38.9% 증가). 과육의 경도를 측정한 결과, 무병묘와 바이러스 감염묘의 과실은 39.6~46.1 (N/Ø 8 mm)으로 시험구간 차이가 크지 않았다. 그러나 바이로이드 단일 및 바이러스와 복합 감염된 묘의 과실 경도는 평균 61.2 N으로 무병묘 대비 최대 48.2% 증가하였다. 과피의 붉은 색 정도를 측정하는 색차계 측정값(Hunter value *a*)은 무병묘와 바이러스 감염 과실이 18.0~19.6으로 시험구간 유의차는 없었다(Table 3). 그러나 바이로이드 단일 및 복합 감염묘 과실의 *a*값은 평균 0.83으로 무병묘 및 바이러스 감염 과실과 확연한

Table 3. Comparison of hunter value and anthocyanin content of fresh apples from trees infected and non-infected with apple virus and viroid.

Test groups	Year of harvesting	Hunter value			Anthocyanin content ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
		<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	
VF	2021	47.3±3.23 ² c ³	18.0±2.50 a	18.2±1.75 c	21.7±4.19 c
ASGV		55.2±4.43 b	19.6±4.81 a	20.9±2.13 b	18.1±1.75 d
ASPV+ASGV		46.2±3.61 c	19.3±3.69 a	17.9±1.99 cd	25.6±3.46 b
ACLSV+ASPV+ASGV		45.7±4.46 d	18.5±3.96 a	17.4±2.40 d	29.1±5.29 a
ASSVd		56.8±2.59 a	1.1±4.00 b	24.3±1.61 a	4.0±0.73 e
ASSVd+ ASPV+ASGV		55.8±2.58 ab	1.2±4.02 b	24.2±1.63 a	4.6±1.20 e
ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV		56.4±2.02 ab	0.2±3.28 c	24.4±1.38 a	4.6±1.14 e
VF	2022	44.9±2.91 d	25.5±2.74 a	15.5±1.46 d	21.7±2.79 b
ASGV		46.7±2.39 c	23.9±2.32 a	16.5±1.36 c	18.2±3.96 c
ASPV+ASGV		44.4±3.03 d	25.3±3.30 a	15.2±1.50 d	25.9±0.35 a
ACLSV+ASPV+ASGV		44.6±2.92 d	25.7±2.78 a	14.9±1.20 d	14.6±1.20 d
ASSVd		56.4±3.11 a	-1.3±5.74 c	23.5±2.22 a	3.2±0.76 e
ASSVd+ ASPV+ASGV		54.9±2.66 b	1.6±4.76 b	22.4±1.66 b	4.7±0.90 e
ASSVd+ACLSV+ASPV+ASGV		54.5±2.35 b	1.5±3.66 b	21.9±1.51 b	3.6±0.70 e

²Results are presented as the mean ± standard deviation for 30 apples in each group.

³Values with different alphabet letters (a-d) indicate significantly differences at $p < 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

차이를 확인할 수 있었다. 과피의 착색과 관련된 안토시아닌 함량 측정 결과(Table 3) 무병묘 과실은 $21.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 바이러스 과실의 평균 함량은 $24.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 바이러스 감염 시험구가 조금 더 높게 측정되었다. 그러나 바이로이드 단일 및 복합 감염 과실의 안토시아닌 함량은 평균 $4.4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 무병묘 과실 대비 최대 85.3% 감소하였다. 과실의 당도는 대부분의 시험그룹에서 큰 차이는 없지만 ASGV 감염 과일의 당도가 가장 높게(17.3°Bx) 측정되었다. 그러나 종합적인 과실 분석 결과 ASGV 감염 과실은 과중 감소 및 과숙 현상(과점 키지고 왁스 조기 누출) 등으로 인해 과실의 상품성이나 저장성 측면에서는 부정적인 영향이 더 크다고 판단된다.

2022년 과실 조사 결과는 2021년과 유사한 경향을 나타냈다. 영양 생장이 증가한 만큼 평균 과중도 증가하여 무병묘 과실은 405.7g 으로 측정되었다(Table 2). 바이러스 감염 과실은 평균 288.3g 이고, 바이로이드 단일 및 복합 감염 과실은 평균 185.5g 으로 무병묘 대비 감염묘 과실의 과중은 최대 54.6% 감소하였다. 당도는 2021년 결과와 다르게 무병묘와 바이러스 감염 과실에서 유의한 차이가 없었으며, 바이로이드 단일 및 복합 감염의 과실에서는 무병묘 대비 2브릭스 이상 당도가 감소(최대 14.2%)하였다. 착색 정도를 측정된 결과, Hunter *a* 값은 무병묘와 바이러스 감염 과실 시험구간 내에서는 유의한 차이가 없었고(평균 25.1), 바이로이드 단일 및 복합 감염 과실은 평균 0.6으로 2021년 조사 결과와 비슷하게 수치가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Table 3). 과피색소함량은 무병묘 $21.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 이고, 바이러스 감염묘는 $14.6\sim 25.9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 으로 무병묘 보다 바이러스 감염묘의 과피색소함량이 높아지거나 조금 낮아진 것으로 나타났다. 그러나 바이로이드 단일 및 복합 감염 과실은 평균 $3.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 무병묘 대비 과피색소함량이 최대 85.3% 감소함을 확인하였다.

최근 유전체 분석 기법의 발전과 함께 과수 바이러스 관련 분야에서도 유전체 단위에서의 감염 영향을 분석하고 있다. 사과 잠복바이러스 중 대표적인 바이러스인 ASGV 감염/무병 사과의 전사체 비교·분석(transcriptome profiling) 결과 320개 유전자 발현의 변화를 확인하였다(Chen *et al.*, 2014). 이 중 184개의 유전자는 발현이 상향 조절되었고, 136개의 유전자는 하향 조절되었다. 또한 ASGV 감염으로 영향이 있었던 유전자는 세포벽 합성, 과실 발달, 광합성, 호르몬 합성, 생화학적/비생물학적 스트레스 등에 관련되어 있었으며, 특히 식물 방어 기작, 스트레스 관련 유전자의 대부분이 유전자 발현량이 낮아졌다. 이러한 결과로 ASGV 감염은 가시적인 증상은 없으나 환경에 따

라 다양한 형태의 영향이 나타날 수 있음을 시사하였다. 포도잎 말림바이러스-3(Grapevine leafroll-associated virus-3)은 경제적 손실을 가장 많이 야기하는(Atallah *et al.*, 2012) 포도 바이러스병 중 하나로, 감염묘와 무병묘의 유전체 비교·분석을 통해 과실 당도, 안토시아닌 함량이 낮아지는 이유를 밝혔다(Perrone *et al.*, 2017; Vega *et al.*, 2011). 바이러스 감염으로 과일이 익어가는 시기에 당 물질대사와 안토시아닌 생합성 관련 유전자 발현량이 감소하고 당 이동 관련 인자가 앞에서 축적되어 광합성과 과피의 안토시아닌 축적을 방해한다고 추측하였다. 또한 호프스틴트바이로이드(Hot stunt viroid)가 감염된 체리의 유전체 분석 결과, 무병묘와 비교하여 1,500여개의 유전자 발현에 변화가 있었고, 식물호르몬, 식물-기주 상호작용, 이차 대사산물-플라보노이드 생합성 관련 유전자의 영향으로 감염 시 과실에 나타나는 증상(얼룩무늬)과의 연관성을 확인하였다(Xu *et al.*, 2020). 본 연구에서도 감염 '홍로' 사과 과실의 과중 감소, 착색 불량 등을 확인하였으며 이러한 영향이 과실 발달, 당 대사, 안토시아닌 생합성 관련 등의 유전체 발현량에 영향을 미칠 것으로 추측한다. 따라서 후속 연구에서는 유전체 단위에서의 감염 피해 영향을 분석하고, 분석 결과를 바탕으로 분자수준의 생리기작 관련 바이러스 및 바이로이드의 감염 영향을 확인할 필요가 있다.

본 연구의 종합적인 결론은 국내 육성 품종인 '홍로' 사과가 바이러스와 바이로이드 감염에 의해 수체 영양 생장 및 과실 품질 저하에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 잠복바이러스로 알려진 바이러스 감염은 수체 생장에 바이로이드 감염만큼 영향을 미치지 않지만, 과중 및 수량 감소 등의 과실 영향을 확인했다. 또한, 바이로이드 단일 및 바이러스와의 복합 감염은 수체 생육 및 과실 품질에 매우 큰 저해요소임을 확인하였다. 그러므로 본 연구는 바이러스 및 바이로이드 감염에 의한 피해 정도를 무병묘와 비교하여 수치화하여 과학적이고 종합적인 데이터를 구축한 것에 큰 의의가 있다고 사료된다.

적 요

본 연구는 '홍로' 사과의 바이러스와 바이로이드 감염이 수체 생장 및 과실 영향을 분석하기 위해 수행되었다. 무병묘와 감염묘를 동일한 환경 조건에서 비교하고 분석하기 위해 2019년 국립원예특작과학원 원내에 실증포장을 조성하고 수체 생장 및 과실 품질을 조사하였다. 수체 생장은 연도별로 조사하였고, 과실은 2021-2022년 시험수의 재식 3~4년차에 2년동안 조사하

여 과실 수량, 무게, 경도, 당도, 산도, 안토시아닌 함량을 측정하였다. 연구 결과 바이러스와 바이로이드 감염에 의해 '홍로'의 수고(14.0%), 주간직경(23.1%), 과실 수량(65.0%), 과중(34.4%), 과피의 안토시아닌 함량(39.8%)은 감소하였으며, 경도(33.2%)와 산도(39.8%)는 증가하였다. 이러한 결과는 사과 바이러스병과 바이로이드병의 피해를 이해하고 효과적인 방제를 통해 사과 과원에 재배적인 도움이 될 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립원예특작과학원 연구개발사업(PJ014481)의 지원에 의해 수행되었음.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Agrios, G.H. 1997. Plant Pathol 4th Edition, Academic Press, San Diego, USA. p. 635.

Atallah, S.S., M.I. Gomez, M.F. Fuchs and T.E. Martinson. 2012. Economic impact of grapevine leafroll disease on *Vitis vinifera* cv. Cabernet franc in finger lakes vineyards of New York. Am. J. Enol. Vitic. 63:73-70.

Baumann, G. and G.E. Bonn. 1988. The influence of apple mosaic virus and rubbery wood on growth and cropping of apple trees on M9 Till the 13th orchard year. Erwerbsobstbau 30:162-165.

Brunt, A.A., K. Crabtree, M.J. Dallwitz, A.J. Gibbs and L. Watson. 1996. Virus of plants in Australia: descriptions and lists from the vide database. Viruses of Tropical Plants Descriptions & Lists from the Vide Database.

Cambell, A. 1963. The effect of some latent virus infections on the growth and cropping of apples. J. Horti. Sci. 38(1):15-19.

Chamberlain, E.E., J.D. Atkinson, J.A. Hunter and G.A. Wood. 1971. Effect of apple mosaic virus on growth and cropping of 'Freyberg' apple trees. J. Agri. Res. 14:936-943.

Chen, S., T. Ye, L. Hao, H. Chen, S. Wang, Z. Fan, L. Guo and T. Zhou. 2014. Infection of apple by apple stem grooving virus leads to extensive alterations in gene expression patterns but no symptoms. PloS One 9(4):e95239.

Cho, I.S., S.J. Kwon, J.Y. Yoon, B.N. Chung, J. Hammond and

H.S. Lim. 2017. First report of apple necrotic mosaic virus infecting apple trees in Korea. J. Plant Pathol. 99(3):815.

Flores, R., S. Minoia, A. Carbonell, A. Gisel, S. Delgado, A. López-Carrasco, B. Navarro and F. Di Serio. 2015. Viroids, the simplest RNA replicons: How they manipulate their hosts for being propagated and how their hosts react for containing the infection. Virus Res. 209:136-145.

Hadidi, A., G. Vidalakis and T. Sano. 2017a. Economic significance of fruit tree and grapevine viroids. In Hadidi, A., R. Flores, J.W. Randles and P. Palukaitis (eds.), Viroids and Satellites, Academic Press, London, UK. pp. 15-25.

Hadidi, A., M. Barba, Ni. Hong and V. Hallan. 2017b. Viroids and Satellites, Academic Press, London, UK. pp. 217-228.

Hammond, R.W. 2017. Economic significance of viroids in vegetable and field crops. In Hadidi, A., R. Flores, J.W. Randles and P. Palukaitis (eds.), Viroids and Satellites, Academic Press, London, UK. pp. 5-13.

Hashimoto, J. and H. Koganezawa. 1987. Nucleotide sequence and secondary structure of Apple scar skin viroid. Nucleic Acids Res. 15:7045-7052.

Kim, H.R., J.S. Kim, J.H. Hwang, S.H. Lee, G.S. Choi, G.S. and Y.M. Choi. 2004. Influence of ACLSV-infection on fruit quality of 'Hongro' apples. Res. Plant Dis. 10(2):145-149 (in Korean).

Kim, H.R., S.H. Lee, D.H. Lee, J.S. Kim and J.W. Park. 2006. Transmission of apple scar skin viroid by grafting, using contaminated pruning equipment, and planting infected seeds. Plant Pathol. J. 22(1):63-67.

Korea Rural Economic Institute. 2023. Agricultural Outlook Center. Monthly Agricultural Observation Report (April 2023 Issue). Available from <http://aglook.krei.re.kr/main/uObserveMonth>

Korean Statistical Information Service. 2022. Cultivated Area of Orchard (Field) and Fruit Production. Available from <http://kosis.kr/statisticsList>

Lee, S., J.-S. Cha, Y. Kwon, Y.S. Lee, S.E. Yoo, J.H. Kim and D. Kim. 2020. Occurrence status of five apple virus and viroid in Korea. Res. Plant Dis. 26(2):95-102.

Li, G., J. Li, H. Zhang, J. Li, L. Jia, S. Zhou, Y. Wang, J. Sun, M. Tan and J. Shao. 2023. ASSVd infection inhibits the vegetative growth of apple trees by affecting leaf metabolism. Front. Plant Sci. 14:1137630.

Lim, S.M., J.S. Moon, I.S. Cho, H.R. Kim and S.H. Lee. 2019. First report of apple hammerhead viroid infecting apple trees in South Korea. Plant Dis. 103(10):2700.

- Loanna, M., B. Despoina, I. Loannis, O. Antonio, V. Christina, V. Nikon and W. Sek-Man. 2017. Simultaneous detection of three pome fruit tree viruses by one-step multiplex quantitative RT-PCR. *PLoS One* 12(7):e0180877.
- López-Carrasco, A. and R. Flores. 2017. Dissecting the secondary structure of the circular RNA of a nuclear viroid *in vivo*: A “naked” rod-like conformation similar but not identical to that observed *in vitro*. *RNA Biol.* 14:1046-1054.
- Ma, L., Q. Zeng, W. Huang, S. Wang, Y. Zhang, Y. Cheng, Q. Zhang, S. Wang, L. Hao, C. Xu, Y. Yu, B. Wang, T. Li and F. Jiang. 2021. Incidence of major pome fruit tree viruses and viroids in commercial pear orchards in China and in *Pyrus betulifolia* seedling. *Plant Pathol.* 70(6):1467-1475.
- Meijnske, C.A.R., H.J. van Oosten and H. Peerbooms. 1975. Growth, yield and fruit quality of virus-infected and virus-free ‘Golden Delicious’ apple trees. *Acta Hort.* 44:209-212.
- Nemeth, M.V., L. Szalay-Marzso and A. Posnette. 1986. *Virus, Mycoplasma and Rickettsia Diseases of Fruit Trees*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. p. 840.
- Oh, S., S.H. Moon, K.-I. Jang, J. Lee and D. Kim. 2023. Comparison of fruit characteristics of ‘Fuki’/M.26 in response to ethephon treatment and combined treatment of ethephon and CaCl₂ during maturing stages. *Korean J. Plant Res.* 36(5):517-526 (in Korean).
- Perrone, I., W. Chitarra, P. Boccacci and G. Gambino. 2017. Grapevine-virus-environment interactions: an intriguing puzzle to solve. *New Phytologist* 213:983-987.
- Posnette, A.F., R. Cropley and C. Ellemberger. 1963. The effect of virus infection on the growth and crop of apple, pear and plum trees. *Phytopathol. Mediterr.* 2:158-161.
- Sampson, P.J. and G.R. Johnson. 1974. Effects of rootstocks, scion, variety and virus complement on fruit production and growth of young apple trees. *J. Hort. Sci.* 49:183-187.
- Schmidt, H. 1972. The effect of ‘latent’ virus infections on the yield of maiden trees on 20 apomictic apple seedling rootstocks. *J. Hort. Sci.* 45:159-163.
- Siegelman, H.W. and S.B. Hendricks. 1958. Photocontrol of alcohol, aldehyde, and anthocyanin production in apple skin. *Plant Physiol.* 33(6):409-413.
- Sutic, D.D., R.E. Ford and M.T. Tomic. 1999. Virus disease of fruit trees. In Sutic, D.D., R.E. Ford and M.T. Tomic (eds.), *Handbook of Plant Virus Diseases*. CRC Press, Boca Raton, FL (USA). pp. 321-432.
- Szychowski, J.A., M.V. McKenry, M.A. Walker, J.A. Wolpert, R. Credi and J.S. Semancik. 1995. The vein-banding disease syndrome: A synergistic reaction between grapevine viroids and fanleaf virus. *Vitis* 34:229-234.
- Umer, M., J. Liu, H. You, C. Xu, K. Dong, N. Luo, L. Kong, X. Li, N. Hong, G. Wang, X. Fan, J. Kotta-Loizou and W. Xu. 2019. Genomic, morphological and biological traits of the viruses infecting major fruit trees. *Viruses* 11(6):515-526.
- van Oosten, H.J., C.A.R. Meijnske and H. Peerbooms. 1982. Growth, yield and fruit quality of virus-infected and virus-free golden delicious apple trees, 1968-1982. *Acta Hort.* 130:213-220.
- Vega, A., R.A. Gutiérrez, A. Peña-Neira, G.R. Cramer and P. Arece-Johnson. 2011. Compatible GLRaV-3 viral infections affect berry ripening decreasing sugar accumulation and anthocyanin biosynthesis in *Vitis vinifera*. *Plant Mol. Biol.* 77:261-274.
- Verhoeven, J.T.J., R.W. Hammond and G. Stancanelli. 2017. Economic significance of viroids in ornamental crops. In Hadidi, A., R. Flores, J.W. Randles and P. Palukaitis (eds.), *Viroids and Satellites*, Academic Press, London, UK. pp. 27-38.
- Wood, G.A. 1974. Elimination of latent apple viruses shows growth and yield improvement. *Orchard NZ* 47(6):173.
- _____. 1978. Effect of rubbery wood disease on growth and yield of golden delicious apple trees. *Orchard NZ* 51:66-67.
- Xu, L., X. Zong, J. Wang, H. Wei, X. Chen and Q. Liu. 2020. Transcriptomic analysis reveals insights into the response to *Hop stunt viroid* (HSVd) in sweet cherry (*Prunus anium* L.) fruits. *PeerJ* 8:e10005.

(Received 20 February 2024 ; Revised 19 April 2024 ; Accepted 25 April 2024)