젖소 유방염과 원유의 미생물학적 위해성: 식품안전 및 공중보건 관점에서의 최신 동향

Mastitis in Dairy Cattle and Microbiological Risks of Raw Milk: Recent Trends in Food Safety and Public Health

송광영[1], 서건호[2*]

Kwang-Young Song[1], Kun-Ho Seo[2*]

[1]대구한의대학교 반려동물보건학과 및 반려동물산업학과
[2]건국대학교 수의과대학 공중보건학 및 원헬스연구소

[1]Department of Companion Animal Health and Department of Pet Industry, Daegu Haany University, Gyeongsan, Korea
[2]Center for One Health and Department of Public Health, College of Veterinary Medicine, Konkuk University, Seoul, Korea

서 건 호

Correspondence to

Kun-Ho Seo, Center for One Health and Department of Public Health, College of Veterinary Medicine, Konkuk University, Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul, 05029, South Korea.
Tel.: 02-450-4121
Fax: 02-3436-4128
E-mail: bracstu3@konkuk.ac.kr

초록

젖소 유방염은 낙농 현장의 대표 질병으로 원유의 품질과 식품안전에 직접적 영향을 미친다. 주요 병원체는 전염성(*Staphylococcus aureus, Streptococcus agalactiae, Mycoplasma* spp.), 환경성(*Escherichia coli, Klebsiella* spp., *Streptococcus uberis*), 그리고 비-아우레우스 포도상구균(CNS, coagulase-negative staphylococci)으로 요약된다. 발병 기전은 유두 말단 장벽이 약화된 틈으로 균이 침입하고, 유선 내 부착증식과 면역회피를 거쳐 염증이 유발되는 순서로 진행된다. 그 결과 체세포수(somatic cell count)가 상승하고 세균숙주 유래 분해효소와 독소가 축적되어 우유 조성 변화와 가공적성 저하로 이어진다. 식품안전 측면의 핵심 위해는 i) *S. aureus*의 엔테로톡신(열에 안정적일 수 있어 원유 단계에서 형성되면 위험), ii) 장출혈성 대장균(EHEC) 등 병원성 대장균의 Shiga toxin 매개 중증 위해(교차오염 등 위생 실패 시), iii) 저온성 성장효소 활성에 따른 품질 저하다. 한편 항생제 치료는 휴약기간 미준수 시 잔류 위해를 높이고, 반복 사용은 내성(AMR, antimicrobial resistance) 선택압을 키우므로 농장-가공 단계의 이중 삼중 모니터링이 요구된다. 본 논단에서는 병원체 군, 발병 기전, SCC-품질 연계, 항생제 잔류AMR, 국제 기준 동향을 통합적으로 정리하고, 농장 GHP/SSOP와 착유 위생, 오염우유 분리신속 냉각(≤4 ℃), 선택적 건유요법+내부 티트실런트, 배양감수성 및 qPCR/LAMP인라인 센서 기반 조기진단, 가공 단계의 HACCP 검증으로 구성된 실천적 관리 방안을 제안한다. 결론적으로 유방염 관리는 축산 질병 대응을 넘어 원유 식품안전과 공중보건을 동시에 지키는 핵심 요소이며, One Health

관점의 농장–가공–감시 연계 프레임으로 정착할 때 품질안전경제성을 함께 달성할 수 있다.

주제어: 젖소 유방염; 원유; 식품안전; 체세포수(SCC); 항생제 잔류; 항생제 내성(AMR); HACCP; One Health

서론

전 세계 유제품 시장은 향후 지속 성장이 전망된다. OECD/FAO(2025)에 따르면 아시아태평양을 중심으로 수요가 확대되면서 원유 위생관리와 식품안전의 중요성이 더욱 커지고 있다[1]. 유제품 산업의 성장은 단순한 생산 확대를 넘어 미생물 오염, 항생제 내성(AMR), 공중보건 리스크를 동시에 관리해야 하는 과제를 동반한다[2]. 낙농 현장의 대표 질병인 젖소 유방염(mastitis)은 생산성 저하와 함께 원유의 체세포수 상승, 물리화학적 조성 변화, 가공적성 저하를 초래한다[3]. 감염 개체는 병원체를 원유로 배출하여 위생 지표를 악화시키며, 치료에 사용된 항생제는 휴약기간 미준수 시 잔류 위험, 반복 사용 시 내성 선택압을 높인다. 주요 원인균은 전염성(*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae*, *Mycoplasma* spp.), 환경성(*Escherichia coli*, *Klebsiella spp.*, *Streptococcus uberis*) 및 비-아우레우스 포도상구균(CNS)으로 요약된다[4]. 이들 병원체는 착유 과정과 환경을 통해 원유를 오염시킬 수 있다. 특히 *S. aureus*의 엔테로톡신은 열에 안정적일 수 있어 원유 단계에서 생성되면 가공 후에도 위해가 남을 수 있다[5]. 반면 *Listeria monocytogenes*와 *Salmonella* spp.는 적정 저온살균으로 사멸되지만, 부적절한 가열 또는 가열 후 교차오염 시 공중보건 문제가 발생한다[6]. 이러한 감염 → 원유 오염(세균독소, 항생제 잔류) → 가공유통 → 소비자 위해의 흐름은 그림 1에 정리하였다.

최근에는 조기진단(qPCR/LAMP, 인라인 센서), 박테리오파지항균 펩타이드프로바이오틱스 등 항생제 대체보완 전략, 착유 전후 위생환경 개선백신 등 예방 중심 관리가 강조되고 있다[7].

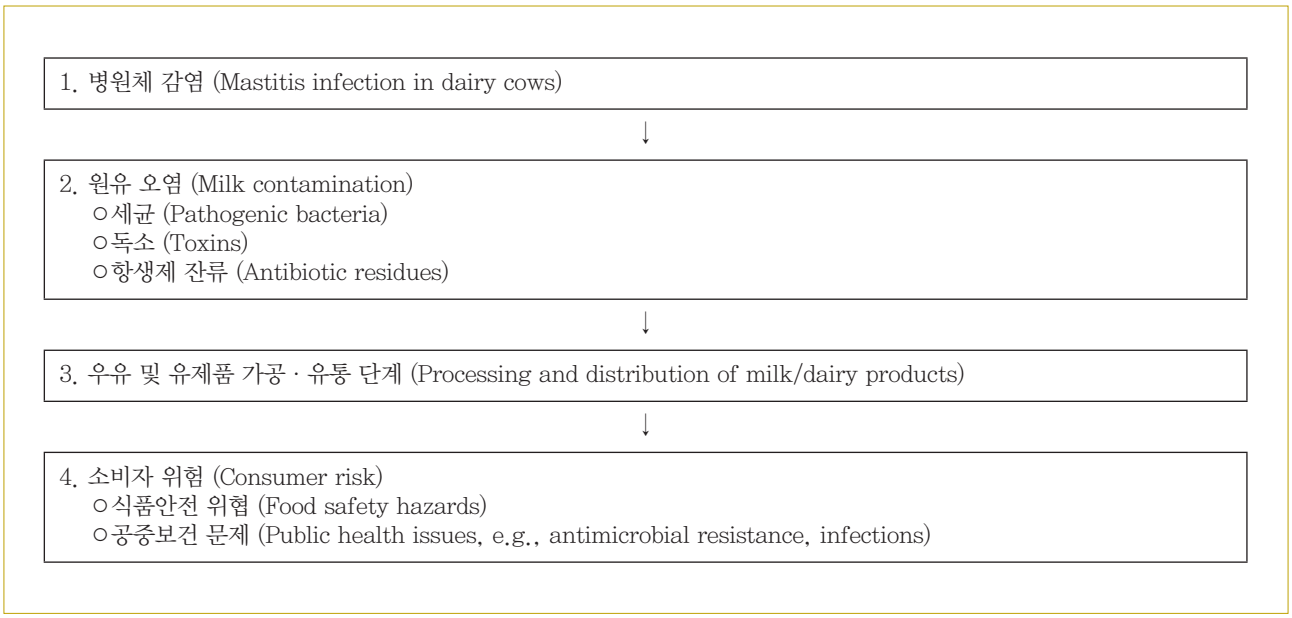

그림 1. 젖소 유방염에 의한 원유 오염 및 식품안전 리스크 경로

본 총설의 목적은 ① 전염성 · 환경성 · CNS로 구분한 핵심 병원체군과 발병 기전을 도식화하고(그림 1 참조), ② 원유 오염 경로 – SCC – 가공적성의 연계를 최신 근거로 요약하며, ③ 항생제 잔류 및 AMR의 위험과 국제/국내 기준을 비교 정리하고, ④ 농장 GHP/SSOP – 오염우유 분리신속 냉각(≤4 ℃) – 선택적 건유요법+내부 티트실런트 – 배양감수성qPCR/LAMP인라인 센서를 결합한 현장 실행 전략을 제시하는 데 있다. 이를 통해 품질 · 안전 · 안제성을 동시에 개선하는 One Health 기반 의사결정 틀을 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 젖소 유방염의 원인 및 발병 기전

2.1 주요 원인균

젖소 유방염은 "많은 균이 잠재적으로 관여할 수 있으나, 실제 발생과 지속확산을 좌우하는 소수 핵심 병원체가 대부분을 차지한다"는 특성이 뚜렷하다. 150종 이상의 세균이 보고되었으나, 실제 임상아급성잠복 감염을 합쳐 현장에서 문제를 만드는 95% 이상은 전염성 병원균(우유를 매개로 착유 중 소소 간 전파), 환경성 병원균(깔짚물통분뇨토양 등 외부 오염원 유래), 그리고 비-아우레우스 포도상구균(CNS; coagulase-negative staphylococci)로 요약된다[8-10]. 각 그룹은 유입 경로병원성 인자임상 양상치료 반응예방 전략과 원유 위생식품안전상 파급효과가 뚜렷이 다르므로, 병원체 분류에 따른 관리가 핵심이다.

먼저 전염성 병원균의 대표는 *Staphylococcus aureus, Streptococcus agalactiae, Mycoplasma* spp. 이다[11]. *S. aureus*는 유두피부와 유선상피에 부착하는 다수의 세포외기질 인식 부착 단백질 (microbial surface components recognizing adhesive matrix molecules), 단백분해효소, α-toxin PVL 등 독소, 다당질 기반의 생물막 형성 능력을 통해 유선 내 미세농양을 만들고 세포내 잠복을 반복한다. 그 결과 균 배출이 간헐적이고 내약성(특히 β-락탐분해효소[β-lactamase] 매개)과 재발이 잦아 치료율이 낮다. 임상적으로는 경도의 유방염부터 만성 아급성 형태까지 스펙트럼이 넓고, 체세포수(somatic cell count)와 벌크탱크 세균수 상승, 치즈수율 저하(카제인 분해), 효소 유래 쓴맛비누맛 증가 등 품질 손상을 유발한다. *S. agalactiae*는 거의 전적으로 유선 내에 적응한 '진성 전염성' 병원체로, 집단 내 은밀하게 퍼지며 벌크탱크(목장 집합원유 냉각저장 탱크) 지표 악화의 주범이 된다. 다만 β-락탐류(β-lactam류)에 대한 감수성이 비교적 유지되는 경우가 많아 집단적 치료검출-제거 프로그램으로 '근절 가능한' 드문 예외다. *Mycoplasma bovis*를 중심으로 한 *Mycoplasma* spp.는 세포벽이 없어 β-lactam에 자연내성이고, 여러 유방 사분(quarters)이 동시에 수양성 분비물, 급격한 생산량 하락, 항생제 반응 부재, 재발이 특징이다[12]. 호흡기, 관절염, 중이염 등 전신 질환과 동반될 수 있으며, 우유집유차착유장치 매개로 빠르게 확산하므로 신속한 개체 격리도태와 장비 위생이 관리의 축이 된다. 전염성 병원균 통제의 요체는 착유 위생(장갑 착용, 프리디핑(전처리 유두소독)개별 1회용 타월, 감염우 후착유, 착유군 내 동선분리), 장비 진공라이너 관리, 감염우 탐지 후 신속 처리, 분만직후건유기 건유제 및 내부 티트실런트의 적절한 적용이다[13]. 전염성 병원균은 우유 그 자체가 매개체이므로, 개체 수준 치료 성패를 넘어 "착유 체계"의 위생개선이 가장 큰 효과를 낸다.

환경성 병원균에는 *Escherichia coli, Klebsiella* spp., *Streptococcus uberis*가 대표적이다[14]. 이들은 축사환경(젖받이깔짚우사 바닥, 급수조, 분뇨, 토양)에서 유두 끝으로 유입되어 건유기 말기초임기(면역 저하유두구 개방) 등 취약 시기에 신규감염을 일으킨다. *E. coli*와 *Klebsiella*는 내독소(LPS) 매개 전신염증으로 고열무기력탈수와 같은 '과급성(peracute)' 임상형을 보일 수 있으며, 국소 염증에 비해 전신 증상이 두드러진다. *Klebsiella*는 톱밥목재 깔짚(특히 젖은 상태)과 연관이 깊고, 치료반응과 예후가 더 나쁜 경향이 있다[15]. *S. uberis*는 과거 "환경성"으로 분류됐지만, 일부 클론은 착유 사이 전파성도 보여 '환경-전염성 경계'에 위치한다. 환경성 병원균 유방염의 1차 처치는 지지요법(정맥수액, 비스테로이드성

항염증제, 필요 시 항혈전 요법 및 전해질 교정)이다. 항생제는 임상 중증도와 배양감수성 결과에 따라 전신요법과 유방 내 요법의 단독 또는 병용을 결정한다. *E. coli* 백신(J5 등)은 감염 "빈도"보다 "중증도"를 낮추는 예방책으로 유용하고, 깔짚 관리(건조청결자주 교체, 모래 깔짚의 선호), 우사 통기배수 개선, 급수조 세척, 착유 전 유두세정과 건조가 재감염을 줄인다[16]. 환경성 병원균은 "소가 누워 있는 곳이 곧 위험요인"이므로, 분만실병우구역휴식칸 등 고위험 구역의 일상 위생관리가 항생제 선택보다 큰 효과를 낸다[17].

비-아우레우스 포도상구균(CNS; *S. chromogenes, S. simulans* 등)은 대개 경미한 유선염을 일으키며, 임상 증상은 미약하지만 지속감염으로 체세포수를 끌어올려 벌크탱크 품질지표를 악화시키고 유대 성분(단백질)응고성에 불리하게 작용한다[18]. 유두피부유두구 주변 미생물총의 일부로 재감염이 흔하고, 균종 간 병원성 차이가 존재한다. 치료는 분만주기감수성우군 수준 목표(체세포수 기준프리미엄 제도)에 따라 선택적으로 하고, 선택적 건유요법(selective dry cow therapy)과 내부 티트실런트 병행, 유두 피부 상태 개선(습진과각화 관리)로 신규감염을 줄이는 접근이 효과적이다[19].

이들 세 그룹 모두 식품안전 측면에서 원유 위생에 직간접적 영향을 미친다. 구체적으로 첫째, 세균수 상승과 체세포수 증가는 단백질분해(플라스민 활성 증가)와 지방분해(유래 리파아제)로 이어져 우유의 맛향보존성치즈 수율을 떨어뜨린다[20]. 둘째, *Staphylococcus aureus*는 적절한 환경 조건(예: 높은 세균 수, 부적절한 냉각저장, 영양분이 풍부한 우유 내 환경)에서 엔테로톡신을 생성할 수 있다[21]. 이 독소는 열에 비교적 안정적이어서 일반적인 저온살균(63℃, 30분)이나 고온단시간살균(72℃, 15초) 공정에서도 완전히 불활성화되지 않을 수 있다. 따라서 유방염에 감염된 젖소의 원유가 위생 관리 실패로 집유저장가공 과정에 혼입될 경우, 우유 및 유제품을 통한 식중독 발생의 주요 위해 요인이 된다. 셋째, 환경성 그람음성균의 내독소열저항성 효소는 가공 적합성을 저하시켜 제품 불량과 폐기 손실을 초래할 수 있다. 넷째, 치료에 사용된 항생제의 휴약기간 미준수는 잔류위험과 연쇄적 제조장 리콜로 이어질 수 있어, 농장 차원의 기록검사 체계가 필수다. 따라서 축산식품 안전을 위해서는 질병 자체의 '발생 억제'와 함께 감염된 우유의 분리폐기와 휴약기간 준수, 수매 전 잔류항생제 신속검사, 벌크탱크 총세균수(Bactoscan)체세포수 상시 모니터링을 병행해야 한다.

유방염을 제대로 치료하려면 어떤 균이 원인인지 정확히 찾는 것이 성패를 좌우한다[22]. 현장에서는 먼저 간이 검사(캘리포니아 유방염 검사, 전기전도도, 색 변화 확인)로 문제가 의심되는 젖 한쪽(한 유두에 해당하는 부위)을 고른다. 이어 각 젖 한쪽에서 무균적으로 우유를 채취해 검사실로 보내 배양동정하고, 필요 시 신속 단백질 분석(MALDI-TOF) 또는 종특이 PCR을 병행한다[22]. 그 결과를 바탕으로 항생제 감수성을 판단해 치료를 결정한다. *Mycoplasma*는 일반 검사로 검출이 어려워 특수 배양 또는 PCR이 필요하다. *S. aureus*는 생물막 형성으로 병이 오래 끌수록 만성화되고 예후가 나빠지는 경향이 있다. 반면 *Streptococcus agalactiae*가 확인되면 집단 치료와 재검사퇴군(격리/도태) 전략으로 농장 단위 박멸이 가능하다[24]. 환경성 초급성 유방염은 배양 결과를 기다리는 동안 수액, 해열진통, 전해질 보충 등 지지치료를 우선한다. 중증도와 전신 징후에 따라 초기 예후를 판단하고, 필요 시 도태를 고려한다. 재발을 막으려면 오염 경로 차단을 병행해야 하며, 깔짚 청결, 착유 위생(전후 소독), 감염우 분리후착유, 장비 점검세척을 철저히 시행한다.

예방관리의 골자는 (1) 착유 전후 유두 처치(프리딥완전건조포스트딥), (2) 장갑 착용과 손위생, (3) 감염우 식별분리후착유 및 장비 소독, (4) 장비 진공맥동라이너 상태의 주기 점검, (5) 건유기 선택적/전면 건유요법과 내부 티트실런트, (6) 깔짚 건조청결 유지와 급수조 세척배수/통풍 개선, (7) 분만초임기 취약개체 집중관리(영양미네랄에너지 균형), (8) 백신(J5 등)과 농장 맞춤 표준작업지침서(SOP) 정착이다. 이들 조치는 병원체 군별 위험을 동시에 낮추며, 벌크탱크 체세포수세균수폐기율항생제 사

용량재발률 등 핵심 성과지표(KPI)를 안정적으로 개선한다.

요약하면, 젖소 유방염 관리의 본질은 "누가(병원체), 어디서(전염 경로/환경), 언제(건유초임기 등 취약시기), 어떻게(병원성내약성생물막)"의 네 축을 병원체 군별로 구체화해, 진단–치료–예방을 병행하는 것이다. 전염성 병원균은 착유 체계의 위생감염우 통제로, 환경성 병원균은 사양환경 개선과 취약기 보호로, CNS는 유두피부건유기 관리로 각각 주도권을 잡을 때, 원유 품질과 식품안전이 함께 개선된다.

실제로 발생 사례의 95% 이상은 아래 제시한 소수의 핵심 병원균에 의해 유발된다(표 1).

2.2 발병 기전

젖소 유방염은 ① 들어오고(침입) → ② 자리를 잡고 늘어나며(정착증식) → ③ 몸의 방어를 피하고(면역회피) → ④ 염증과 손상을 일으킨다는 흐름으로 이해하면 쉽다[25]. 아래는 이 네 단계에서 실제로 일어나는 일을 간단히 정리한 것이다.

1) 유입: 유두 끝 작은 통로를 통해 들어온다

유두 끝에는 외부 균을 막는 작은 통로(유두관)가 있다. 이 통로는 기름단백질로 된 마개(케라틴)와 근육의 조임이 방어해 준다. 하지만 착유 직후에는 잠깐 완전히 닫히지 않을 수 있다. 이때 과도한 착유, 라이너 슬립역류, 유두 끝의 거칠어짐, 추위습기상처 등으로 방어력이 떨어지면 균이 틈을 타 올라간다. 올라오는 균은 두 부류가 대표적이다. 환경에서 오는 균(*E. coli*, *Klebsiella*, *S. uberis* 등)과 소 사이에 옮는 균(*S. aureus*, *S. agalactiae*, *Mycoplasma* 등)이다. 일부 균은 유두 표면에 붙어 있다가 착유나 자세 변화 때 안쪽으로 밀려 들어간다.

2) 정착면역회피: 붙고, 숨어서, 늘어난다

안으로 들어온 균은 먼저 젖샘 벽에 달라붙어 자리를 잡는다. *S. aureus*는 끈끈한 보호막(생물막)을 만들어 약과 면역 반응을 피하면서 오래 버틴다. *E. coli/Klebsiella*는 표면 구조와 캡슐로 몸속 환경에서 버티는 힘을 키운다. *Mycoplasma*는 세포벽이 없어 β-락탐계 항생제에 본질적으로 내성이 있다. 균이 늘어날수록 독소효소 같은 부산물이 쌓여 염증의 불씨가 켜진다.

3) 염증: '경보기'가 울리고 백혈구가 몰린다

몸은 침입을 감지하면 염증 신호를 보내 백혈구(호중구)를 대량으로 불러들인다. 그래서 우유 속 체세포수가 크게 늘어난다. 백혈구는 균을 없애려 살균 물질과 분해 효소를 내보내지만, 그 과정에서 젖샘 조직도 함께 손상될 수 있다. 특히 *E. coli/Klebsiella* 같은 그람음성균은 내독소 때문에 고열, 젖량 급감, 심하면 패혈증 같은 전신 증상을 일으킬 수 있다.

4) 품질안전 영향: 우유 성분이 흔들리고 맛가공성이 나빠진다.

염증이 지속되면 우유 성분이 바뀌어 나트륨염화물 증

표1. 젖소 유방염에 영향을 주는 병원균

병원균 그룹	대표 세균	주요 특징	식품안전 영향
전염성 병원균	*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae*, *Mycoplasma* spp.	착유 시 젖소 간 전파	독소 생성, 원유 오염
환경성 병원균	*E. coli*, *Klebsiella* spp., *Streptococcus uberis*	깔짚, 물통, 토양 등 환경 오염에서 기인	원유 미생물 부하 증가, 품질 저하
비-아우레우스 포도상구균 (CNS)	*S. chromogenes*, *S. simulans* 등	상대적으로 경미한 염증 유발	체세포수 증가, 원유 품질 저하

가(염 농도 상승), 유당 감소, pH 상승 등이 나타나고, 산유량이 줄고 가공 적성이 떨어진다. 단백질 분해가 진행되면 치즈 응고가 약해지고 수율이 감소한다. 지방 분해로 비린내비누맛 같은 이취가 생길 수 있다. *S. aureus* 독소는 열에 강한 경우가 있어 원유 단계에서 독소가 만들어지면 일부 제품에서 식중독 위험이 된다. 결국 체세포수 상승과 분해 효소독소가 겹쳐 맛보존성응고 특성이 나빠지고, 심하면 벌크탱크 품질 기준(총세균수체세포수) 위반, 반품폐기, 항생제 잔류 같은 안전 문제로 이어질 수 있다.

5) 병원체별 특징

S. aureus: 보호막과 숨기 전략으로 만성재발이 잦아 치료가 어렵다.

S. agalactiae: 소 사이 전염이 주된 경로다. 페니실린 계열이 잘 듣는 경우가 많아, 집단 치료 + 재검사 + 퇴군 전략으로 농장 단위 박멸이 가능하다.

Mycoplasma: 여러 유방 사분(quarters)이 동시에 침범되고 우유가 묽어짐이 흔하다. 흔한 항생제가 잘 듣지 않아 격리도태 중심으로 관리한다.

E. coli/Klebsiella: 갑작스럽고 심한 임상형을 일으킬 수 있다. *Klebsiella*는 톱밥 깔짚과 연관되는 경우가 있어 경과가 나쁜 편이다.

S. uberis: 주로 환경성이지만 착유 중 전파도 가능해 관리 경계가 필요하다.

감염기전을 요약하면, 유두 끝 방어가 잠깐 무너진 틈으로 균이 들어와 자리를 잡고 늘어나면, 몸의 경보가 울려 백혈구가 몰리고, 그 결과 우유 성분과 젖샘 조직이 함께 손상된다. 그 여파로 품질 저하와 안전 문제가 뒤따르며, 어떤 균이 원인인지에 따라 증상예후관리 전략이 달라진다.

3. 젖소 유방염과 원유의 식품안전성

3.1 원유의 미생물학적 위해성

유방염으로 염증이 생긴 유방 사분(quarter)에서 배출된 우유는 이미 병원균과 그 대사산물(독소분해효소)에 노출된 상태이다[26,27]. 이 오염은 착유 중 집유 라인벌크탱크를 통해 벌크탱크 전체 원유(집합 원유)을 2차 오염시키며, 저장가공 단계에서도 품질 저하와 식품안전 문제를 이어 만든다 (표2).

- *Staphylococcus aureus* (전염성 병원체): 유선 내에서 증식하면서 엔테로톡신(SEA – SEE 등)을 생성할 수 있다. 이 독소는 열에 비교적 안정하여 저온살균 뒤에도 잔존 가능하다. 따라서 원유 단계에서 독소가 형성되면, 이후 요거트치즈 등 유가공품 섭취 시 구토 복통설사를 일으키는 급성 식중독 위험이 생긴다. 또한 *S. aureus*가 분비하는 단백질분해지질분해 효소는 우유의 응고력과 풍미를 해치며, 숙주(체세포)에서 나온 플라스민계와 맞물려 치즈 수율 감소이취를 유발한다.
- *Escherichia coli* O157:H7 (환경성 병원체 중 병원형 EHEC): 원유 또는 가공품이 살균 전후 교차오염되면 중대한 공중보건 위해가 된다. 특히 O157:H7은 시가독소(Stx1/2)가 주된 병인으로, 출혈성 대장염 및 용혈성 요독증(HUS)을 일으킬 수 있다. 병인학적으로 EHEC의 핵심 독성은 LPS가 아니라 시가독소다. 위생착유저온보관충분한 가열과 더불어, 생유 섭취 금지가 핵심 예방책이다.
- *Streptococcus uberis* (환경성 연쇄상구균): 주로 품질부패(산패)의 원인이 된다. 유당을 발효해 산을 생성하고, 자체숙주 유래 프로테아제/리파아제가 응고력 저하쓴맛비누맛 같은 관능 결함을 유발한다. 인체 병원성은 낮지만, 벌크탱크에 들어가면 산패 촉진과 유통기한 단축으로 이어진다.

정리하면, 유방염 원인균은 (1) 직접독소(*S. aureus*), (2) 중증 인체병원성(EHEC 등), (3) 발효 및 효소 활성에 따른 품질 저하(*S. uberis* 등)의 경로로 식품안전을 위협한다. 이 때문에 감염우의 우유 분리폐기, 착유라인 위생, 원유의 신속 냉각가공이 HACCP의 필수 관리점이 된다.

표2. 유방염 원인균이 원유에 다양한 오염원으로서 역할

병원균	생성 독소	식품안전 영향	관련 위해/결과
S. aureus	엔테로톡신	유제품 섭취 시 식중독	구토, 설사
E. coli O157:H7	Shiga 독소(Stx1/2)	원유 및 가공품 오염	출혈성 대장염 · HUS (용혈성요독증후군)
Streptococcus uberis	산 생성	우유 산패, 품질 저하	품질 결함(산패, 유통기한 단축)

3.2 항생제 잔류 및 내성 문제

젖소 유방염 치료에는 β-락탐(페니실린세팔로스포린), 마크로라이드, 테트라사이클린 등이 흔히 쓰인다[28]. 치료 자체는 필요하지만, 잔류관리 실패는 식품안전가공적 성내성 관리에서 다층적 위험을 낳는다.

원유에서의 항생제 잔류는 단순한 위생 문제가 아니라 식품안전, 가공 품질, 공중보건에 직결되는 중요한 위해 요인이다. 무엇보다 일부 소비자에서는 β-락탐 계열과 같은 항생제 잔류가 알레르기 반응을 유발할 수 있어 직접적인 건강 위험으로 이어진다[28]. 또한 발효유 제조 과정에서는 잔류 항생제가 스타터 유산균의 활성을 억제하여 산생성 지연, 응고 불량, 관능 결함(이취 등) 발생 등 심각한 품질 사고로 연결될 수 있다. 더 나아가 저농도의 잔류라도 반복적이고 광범위한 노출은 내성균 선택압으로 작용하며, 집유폐수분뇨를 매개로 항생제 내성 유전자의 환경 확산을 촉진하는 잠재적 위험성을 가진다.

이러한 위해를 차단하기 위해 국제적으로 Codex Alimentarius와 국내 식품의약품안전처는 원유와 유제품에 대해 잔류허용기준(MRLs)을 설정하여 관리 체계를 마련하고 있다[29,30]. 농장 단계에서는 휴약기간을 철저히 준수하고, 감염우에서 나온 우유는 반드시 분리폐기해야 한다. 더불어 치료 이력과 조치를 체계적으로 기록하고, 출하 전에는 β-락탐테트라사이클린설폰아마이드 등을 대상으로 한 SNAP, Delvotest류 신속 스크리닝 검사를 통해 이중삼중의 안전망을 구축하는 것이 요구된다.

수매 전 신속 스크리닝 후, 필요 시 확증 검사(confirmatory test)를 실시하며, 부적합 판정 원유는 즉시 차단하여 식품사슬에 유입되지 않도록 원천 봉쇄한다. 즉, 농장에서의 철저한 예방 관리와 공장에서의 최종 검증이 상호 보완적으로 작동할 때, 항생제 잔류로 인한 식품안전 위협을 최소화할 수 있으며, 소비자 건강 보호와 동시에 내성 확산 방지를 달성할 수 있다.

3.3 체세포수와 원유 품질

체세포수(SCC)는 유선으로 유입된 다형핵호중구를 주로 반영하는 우유 1 mL당 체세포 개수이다. 유방 건강과 위생 상태를 반영하는 대표 지표이다.

젖소 유방 건강과 원유 품질 관리에서 체세포수는 중요한 기준선으로 활용된다[31]. 일반적으로 체세포수가 200,000 cells/mL 이하일 경우 유방이 건강한 상태로 간주되며, 잠복 감염률이 낮고 치즈 응고력 및 수율, 저장성 측면에서 유리하다[32]. 반면, 400,000 cells/mL 이상일 경우 아급성 또는 만성 유방염이 의심되며, 효소 활성 증가로 인해 카제인 분해와 지방 산패가 촉진된다[31,32]. 이 때문에 여러 국가나 사업장 규격에서는 해당 수준을 유통 제한이나 경보 기준으로 삼는다.

품질 저하는 유방염으로 인한 염증 과정에서 비롯된다. 염증 시 혈관-유선 장벽 투과성이 증가하면서 Na^+와 Cl^- 농도가 높아지고, K^+와 유당은 감소하며 pH가 상승한다[31-33]. 동시에 플라스민계와 다형핵백혈구 분해효소가 활성화되어 카제인이 분해되고 응고력이 떨어져 치즈 수율이 감소한다. 여기에 리파아제와 세균성 효소 작용이 더해지면서 유리지방산이 증가하고 비누맛이나 이취(off-flavor)가 발생한다. 이러한 변화는 저장 중 미생물 재증식과 결합되어 최종적으로 유통기한을 단축시킨다.

현장에서의 적용은 조기 탐지를 중심으로 이뤄진다. 개

체별사분(quarter)별 체세포수 모니터링을 위해 정기적인 캘리포니아 유방염 검사(CMT), 전기전도도 측정, 자동 체세포 계수법 등이 활용된다[33]. 이를 통해 고위험 개체에 대해 유두 처치, 착유 위생 관리, 건유요법을 최적화할 수 있다. 또한 벌크탱크 체세포수는 유가에 직접 반영되어 페널티나 인센티브로 이어지므로, 고체세포수 개체를 선별해 별도 착유하거나 원유를 제외하는 것이 비용 대비 가장 효율적이다. 가공 현장에서는 고체세포수 원유의 혼입 비율을 최소화하는 것이 응고성과 수율을 개선하는 가장 확실한 방법으로 평가된다.

요약하면, 체세포수 관리는 단순히 젖소 개체 건강을 확인하는 지표를 넘어 원유의 가공적성과 경제적 가치, 나아가 유통 안전성까지 결정짓는 핵심 요소라고 할 수 있다. 또한 낮은 체세포수는 곧 높은 위생높은 수율긴 저장성이다. 반대로 체세포수가 높아질수록 분해효소염증 부산물 때문에 원유의 '가공 자산'이 빠르게 소진된다.

실무 현장에서 젖소 원유의 위생과 품질을 확보하기 위해서는 감염원 차단, 잔류 제로 관리, 그리고 체세포수 최적화를 동시에 수행하는 것이 핵심이다[34].

- 우선 감염원 차단을 위해서는 감염우를 분리하고 후착유를 실시하며, 착유 전후 유두를 철저히 처리(프리포스트딥)하고 착유 장비의 정기적인 점검을 병행해야 한다. 이렇게 해야 유방염 전파를 최소화할 수 있다.
- 잔류 제로 관리를 위해서는 휴약 기간을 철저히 준수하고, 출하 전 신속검사를 통해 항생제 잔류 여부를 반드시 확인해야 한다. 또한 기록 및 표식을 체계화하여 잔류위험 원유가 유통망으로 유입되는 것을 예방하는 것이 중요하다.
- 체세포수 관리 측면에서는 고체세포수 개체를 조기에 식별하여 치료 또는 도태 여부를 신속히 결정하는 것이 필요하다. 특히 건유기에 선택적 건유요법을 적용하고 내부 티트실런트를 사용하는 것은 불필요한 항생제 사용을 줄이면서도 유방 건강을 지킬 수 있는 실효성 있는 방법이다.
- 가공 대응 차원에서는 고체세포수 개체나 의심되는 원유가 가공 풀(pool)(또는 배치(batch)에 섞이지 않도록 관리해야 하며, 스타터 배양의 활성 저해 위험을 평가하여 제품 품질 저하를 예방해야 한다.

요약하면, 미생물 위해 차단 – 잔류 관리 – 체세포수 최적화라는 세 가지 축을 균형 있게 고려해야만, 식품 안전성을 확보함과 동시에 치즈 수율 향상, 폐기율 감소 등 경제성과 규제 준수를 함께 달성할 수 있다. 이는 낙농 현장에서의 지속가능성과 경쟁력 확보에 필수적인 전략이라 할 수 있다.

4. 공중보건 및 국제 규제 동향

4.1 국제 기준

젖소 유방염과 관련된 원유 안전 관리는 각국의 식품안전 정책뿐 아니라 국제 기구의 기준과 권고에 근거한다.

- Codex Alimentarius (국제식품규격위원회, FAO/WHO 공동 주관): Codex는 원유 및 유제품의 위생적 관리 지침(CAC/RCP 57-2004)을 통해 원유 내 병원균 관리 기준을 제시하고, 동시에 수의용 약물의 최대잔류허용기준(MRLs)을 설정하여 국제 교역에서 통일성을 제공한다[29].
- 미국 FDA (Pasteurized Milk Ordinance, PMO): 미국은 "Grade A Pasteurized Milk Ordinance(PMO)"에 따라 원유의 위생 수준을 관리한다. 특히 체세포수는 750,000 cells/mL 이하를 요구하며, 표준평판균수(SPC)는 100,000 CFU/mL 이하로 규정하고 있다[35].
- EU (Regulation (EC) No 853/2004): 유럽연합은 원유에 대해 더욱 엄격한 기준을 설정하여, 체세포수 ≤ 400,000 cells/mL(지수평균기준)을 요구하고, 세균수는 30°C에서 배양 시 ≤ 100,000 CFU/mL로 제한한다. 이는 가공 적합성과 식품안전을 동시에 고려한 수치이다[36].
- WHO (세계보건기구): WHO는 원유가 브루셀라, 살

모넬라, 대장균 O157:H7, 리스테리아와 같은 고위험 병원체에 쉽게 오염될 수 있음을 강조하면서, 모든 원유는 반드시 살균(특히 저온살균법)을 통해 섭취해야 한다고 권고한다. 이는 공중보건 차원에서 생유(raw milk) 음용을 금지하거나 강력히 제한하는 주요 근거로 작용한다[37].

4.2 국내 관리

한국에서는 식품의약품안전처가 중심이 되어 원유 위생 관리 체계를 운영한다[30].

- 위생관리 지침 및 HACCP: 식품의약품안전처는 원유 생산부터 가공유통까지 전 단계에 걸쳐 HACCP(hazard analysis and critical control points) 기반 관리 체계를 적용하고 있다. 특히 집유 수송 단계의 오염 방지, 저온보관, 가공 전 검사 등을 의무화하여 국제 수준의 위생을 확보하고자 한다.
- 검사 항목과 기준: 국내 원유는 체세포수, 세균수, 항생제 잔류 여부를 정기적이고 체계적으로 검사한다.
  - 체세포수: 국내 등급제에 따르면, 1등급 원유는 체세포수 200,000 cells/mL 미만, 세균수는 30,000 CFU/mL 미만을 기준으로 한다.
  - 세균수: 총세균수와 대장균군을 주요 지표로 삼아 위생 상태를 평가한다.
  - 항생제 잔류 검사: β-락탐, 테트라사이클린, 설폰아마이드 등 주요 약물군을 대상으로 상시(또는 전수) 스크리닝 검사를 실시하여, 최대잔류허용기준(MRLs)을 초과하는 우유가 시중에 유통되지 않도록 관리한다.
- 제재 및 관리 강화: 기준을 초과하는 원유는 즉시 유통 제한 및 폐기 조치가 내려지며, 반복 위반 시 목장 단위로 행정처분이 내려진다. 이는 원유의 안전성을 보장하는 동시에, 생산자에게 품질 관리 동기를 부여하는 제도적 장치이다.

요약하면, 국제적으로는 Codex가 기본 지침을 제공하고, 미국은 비교적 완화된 체세포수 기준(750,000 cells/mL), EU는 엄격한 기준(400,000 cells/mL)을 채택하고 있다. WHO는 생유의 병원체 위험을 강조하며 반드시 살균할 것을 권고한다. 국내에서는 식품의약품안전처가 HACCP 기반 관리 체계를 적용하여 체세포수세균수항생제 잔류를 모두 검사하고, 등급제와 유통 제한을 통해 원유의 위생 수준을 국제적으로 경쟁 가능한 수준으로 유지하고 있다.

5. 예방 및 관리 전략

5.1 HACCP 기반 원유 위생관리

원유 안전관리는 "오염을 들이지 않고(prevention) 들어온 오염은 키우지 않으며(control), 소비자 단계로 절대 보내지 않는다(verification)"는 HACCP의 3단 논리로 설계한다[38]. 위험분석의 핵심 위해요소는 전염성/환경성 유방염균, 저온관리 실패, 장비수조 위생, 항생제 잔류다[38]. 이에 맞춘 대표적 중요관리점(CCP)과 운영요령은 다음과 같다.

첫째, 착유 전후 유두 위생이다. 착유 전에는 프리디핑(요오드클로르헥시딘 등) 후 완전 건조로 유두 표면의 환경성 세균을 줄이고, 착유 후에는 포스트디핑으로 유두구가 닫히기 전의 역감염을 차단한다. 유두 말단의 과각화습진은 미생물 부하를 높이므로 주기적 점검과 연화 관리가 필요하다. 둘째, 장비 세척과 CIP(cleaning-in-place)가 안정적으로 돌아가야 한다. 세정알칼리산 순환 (알칼리 세정 → 헹굼 → 산세 → 헹굼(필요 시) → 살균(착유 직전)), 온도시간농도유속을 기록하고, 라이너 교체주기진공맥동 상태를 유지한다. 집유호스필터버킷벌크탱크는 세척 직후 건조가 중요하며, 원수의 경도미생물 지표도 주기 점검한다. 셋째, 원유의 신속 냉각과 저온유지이다. 착유 종료 즉시 벌크탱크에서 빠르게 냉각해 4 ℃ 이하로 유지하고, 탱크 온도교반문 개폐 기록을 남긴다. 저온유지는 세균 증식을 억제하고 열안정 독소 생성 시간을 줄이는 가장 확실한 공정 방어선이다. 넷째, 오염우유의 체계적 분리이다. 임상 유방염고체세포수 개체는 즉

시 표식후착유우유 분리폐기하며, 항생제 투약 시에는 개체유방 사분(quarter) 단위로 휴약기와 재검을 관리한다. 다섯째, 입출고 단계 검증이다. 수매 전 잔류항생제 신속검사와 벌크탱크 체세포수/세균수 모니터링을 통해 부적합 원유의 공정 유입을 차단한다. 환경 관리(깔짚 건조급수조 세척통풍/배수모래 선호), 동선 분리(분만병우 건유우), 파리먼지 제어 등은 위해요소의 근원을 낮추는 선행요건(pre-requisite program)으로 상시 운영한다. 이렇게 설계된 HACCP은 기록모니터링시정조치검증의 PDCA(plan (계획) → do (실행) → check (검토) → act (조치)) 주기로 굴러야 성과가 고정된다.

5.2 조기 진단 및 모니터링 기술

초기 감염을 빨리 찾아 격리조치하면 벌크탱크 오염, 치료비, 폐기율이 기하급수적으로 줄어든다. qPCR은 유방 사분(quarter) 우유 벌크탱크에서 병원체 DNA를 직접 검출해 민감도가 높고, *Mycoplasma* 같이 배양이 까다로운 균을 조기 탐지하는 데 유리하다[8,39]. LAMP는 등온 증폭으로 장비 부담이 적고 현장 적용성이 높아, 현장에서 의사결정이 가능하게 된다. 여기에 나노센서(면역/전기화학/광학)를 이용하면 세포벽 성분독소효소활성 같은 기능적 표지를 빠르게 포착할 수 있어, 감염 여부뿐 아니라 활성도까지 가늠할 수 있다.

상시 모니터링은 IoT(internet of things, 사물인터넷) 기반 인라인 센서가 담당한다[40]. 착유라인에 장착된 실시간 체세포수/전기전도/온도/유량 센서는 유방 사분(quarter) 단위 이상치(급격한 체세포수 상승, 전도도 증가, 우유량 급감)를 감지해 즉시 경보를 띄운다. 데이터는 개체 이력(전산번식과거 체세포수임상 이력)과 결합해 발병 위험 점수화 및 후착유검사 우선순위 자동 추천으로 이어진다.

스마트 착유 로봇은 일관된 전처리(프리스트리핑세정건조)와 자동 디핑, 클러스터 백플러시/UV 같은 위생 모듈, 착유 중 이탈라이너 슬립 감소, 개체별 로그 축적으로 사람 손의 변동성을 크게 줄인다[41]. 로봇의 강점은 "동일 절차의 반복"과 "데이터의 즉시성"으로, 이는 교차오염 최소화와 조기 경보 정확도 향상으로 곧장 연결된다[41]. 현장 배양(18–24 h)과 분자진단(qPCR/LAMP)의 하이브리드 프로토콜을 두면, "오늘 격리—내일 치료결정—모레 재분류"의 빠른 사이클을 구현할 수 있다.

5.3 항생제 최소화 전략

항생제 최소화 전략은 "효과는 유지하고, 사용량은 줄이며, 잔류와 내성은 억제"한다는 목표 아래 네 가지 축으로 정리할 수 있다[42,43].

1) 예방 중심 접근: 우선 예방적 수단을 강화한다. J5 계열 대장균 백신은 감염 자체의 빈도를 낮추기보다는 중증도를 완화하는 효과가 크다[44]. 따라서 과급성 유방염에 따른 폐사나 폐기율을 줄이는 데 유용하며, 분만 전 접종 스케줄을 통해 초임기 방어력을 높일 수 있다. 또한 사료, 깔짚, 유두 피부의 미생물군을 유익균 중심으로 재편하면 병원성 세균이 자리 잡을 틈을 줄일 수 있다[44]. 이를 위해 사료용 프로바이오틱스, 표면 친화성이 높은 젖산균 제제 등이 활용되며, 현장에서는 반드시 안전성과 표준화된 제형을 우선시해야 한다[45].

2) 합리적 건유 및 치료: 휴약기 관리와 선택적 건유요법이다[46]. 모든 개체에 항생제를 사용하는 전면적 건유제 사용은 지양하고, 개체별 체세포수, 임상 이력, 캘리포니아 우유검사(CMT)와 신속진단을 결합해 필요한 개체에만 항생제 건유제를 투여한다. 전 건유우에는 내부 티트실런트를 기본 적용해 신규 감염을 차단한다. 치료 시에는 반드시 배양 및 감수성 시험 결과를 근거로 협범위제를 우선 사용하며, 용량과 기간은 라벨대로 지키고, 처방휴약기재검 내역은 전자기록으로 추적 관리한다.

3) 대체보완 수단 활용: 항생제 대체와 보완 수단을 계층적으로 활용하는 것이다[43]. 니신과 같은 항균 펩타이드, 유기산정유류와 같은 천연 항생제, 박테리오파지 및 엔도리신, 락토페린 등은 특정 상황에서 유두처치, 환경소독, 보조요법에 적용될 수 있다. 다만 제품별 허가 조건, 적용 부위, 잔류 관리 규정을 철저히 준수해야 한다.

더불어 UV-C, 오존, 콜드플라즈마 등 물리적 위생기술은 장비공간 소독에 보조적으로 사용될 수 있으나, 우유 접촉면 안전성, 적정 농도, 노출 시간의 검증이 선행되어야 한다.

4) 관리지표와 피드백: 관리지표를 설정하고 피드백 체계를 마련한다[47]. 월별 항생제 사용량, 임상 발생 및 재발률, 도태 사유 중 유방염 비중, 벌크탱크 체세포수와 세균수, 잔류 부적합률 등을 KPI로 설정하고, 목표치 미달 시 원인 분석(RCA)을 통해 전처리, 분리, 검사, 치료, 환경 관리 프로토콜을 즉시 보완한다. 특히 고체세포수 개체 분리 후착유, 의심 개체의 즉각적 격리표식기록은 항생제 절감과 원유 가공풀 보호에 가장 비용 대비 효과적인 전략으로 꼽힌다.

6. 결론

젖소 유방염은 단순히 낙농업자의 경제적 손실이나 젖소 개체 건강 문제로만 볼 수 없는, 다차원적인 식품위생 공중보건 이슈이다.

유방염과 원유 위생: 유방염에 걸린 젖소에서 생산되는 원유는 세균수와 체세포수가 증가하며, 이는 원유 품질 저하의 핵심 요인이다. 체세포수가 높은 원유는 가공 과정에서 치즈나 발효유 제품의 품질에 직접적 악영향을 주고 저장성도 떨어진다. 또한 병원성 세균이 유방염을 통해 원유에 유입되면 그대로 소비자에게 전달될 위험이 있다.

항생제 사용과 잔류 문제: 유방염 치료에는 항생제가 빈번히 사용되며, 휴약기간 미준수 시 원유에 항생제 잔류물이 남아 식품안전을 위협하고 소비자의 내성균 노출을 높인다. 국제사회가 항생제 내성(AMR)을 One Health 관점의 중대한 글로벌 위기로 다루는 만큼, 농장 단계의 항생제 관리와 잔류 모니터링은 필수적이다.

병원성 미생물 확산과 공중보건: *Staphylococcus aureus, Streptococcus agalactiae, Escherichia coli* 등 주요 병원체는 원유뿐 아니라 착유 장비, 작업자의 손, 낙농 환경을 통해 확산될 수 있다. 이는 목장 내부를 넘어 가공유통 단계에서도 연쇄 오염을 유발하여 소비자 건강을 위협한다.

예방과 관리의 필요성: 유방염 관리는 예방 중심으로 설계되어야 한다. 착유 전후 철저한 위생관리, 착유 장비의 소독, 개체별 건강 모니터링, 적절한 사양(영양스트레스) 관리, 신속한 감염 개체 격리가 기본이다. 또한 원유 검사(체세포수, 세균수, 항생제 잔류 검사)에 기반한 주기적 품질 모니터링이 반드시 뒷받침되어야 한다.

One Health 기반 통합 접근: 유방염 관리와 원유 위생 확보는 가축 건강(animal health) – 식품안전(food safety) – 인간 건강(human health)을 함께 고려하는 One Health 접근이 필요하다. 가축 위생관리, 항생제 사용 지침, 식품안전 규제, 소비자 인식 개선이 유기적으로 연계될 때 사회경제보건 피해를 최소화할 수 있다.

정리하면, 젖소 유방염은 원유 위생관리 – 식품안전 – 공중보건 – 항생제 내성 대응을 아우르는 다층적 위협 요인이다. 철저한 현장 관리와 더불어 One Health 기반의 통합 관리 체계(의사결정 틀)를 구축하는 것이 가장 근본적이고 지속가능한 해결책이다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) [Grant No. RS-2024-00341262].

참고 문헌

1. OECD/FAO (2025), OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034, Rome, Italy, https://doi.org/10.1787/601276cd-en.

2. Belayneh SB, Luak CK, Bamboro SA. Pathogenic bacteria in raw milk and milk products in Ethiopia: A decade review of prevalence, contributing factors, and antimicrobial resistance. A systematic review and meta-analysis. SAGE Open Med. 2025:13:20503121251353356.

3. Ibeagha-Awemu EM, Wang M, Zhao X. Invited review: Multiomics insights into the molecular and regulatory mechanisms underlying bovine mastitis. J Dairy Sci. 2025;108(9):9004-9033.

4. Panchal J, Patel A, Patel S, Goswami D. Understanding mastitis: Microbiome, control strategies, and prevalence - A comprehensive review. Microb Pathog. 2024;187:106533.

5. Touaitia R, Ibrahim NA, Touati A, Idres T. *Staphylococcus aureus* in bovine mastitis: A narrative review of prevalence, antimicrobial resistance, and advances in detection strategies. Antibiotics (Basel). 2025;14(8):810.

6. Williams EN, Van Doren JM, Leonard CL, Datta AR. Prevalence of *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Shiga* toxin-producing *Escherichia coli*, and *Campylobacter* spp. in raw milk in the United States between 2000 and 2019: A systematic review and meta-analysis. J Food Prot. 2023;86(2):100014.

7. Zadoks RN, Scholz E, Rowe SM, Norris JM, Pooley HB, House J. A framework for evaluation of on-farm mastitis diagnostics in Australia. Aust Vet J. 2023;101(4):142-152.

8. Algharib SA, Dawood AS, Huang L, Guo A, Zhao G, Zhou K, Li C, Liu J, Gao X, Luo W, Xie S. Basic concepts, recent advances, and future perspectives in the diagnosis of bovine mastitis. J Vet Sci. 2024;25(1):e18

9. Patel K, Godden SM, Royster E, Crooker BA, Timmerman J, Fox L. Relationships among bedding materials, bedding bacteria counts, udder hygiene, milk quality, and udder health in US dairy herds. J Dairy Sci. 2019 Nov;102(11):10213-10234.

10. Kerro Dego O, Vidlund J. Staphylococcal mastitis in dairy cows. Front Vet Sci. 2024;11:1356259.

11. Nobrega DB, French JE, Kelton DF. A scoping review of the testing of bulk milk to detect infectious diseases of dairy cattle: Diseases caused by bacteria. J Dairy Sci. 2023;106(3):1986-2006.

12. Gelgie AE, Desai SE, Gelalcha BD, Kerro Dego O. *Mycoplasma bovis* mastitis in dairy cattle. Front Vet Sci. 2024;11:1322267

13. Risvanli A, Safak T, Yilmaz O, Yuksel B, Saat N, Tanyeri B. A novel approach in the prevention of mastitis: electrical teat dipping. J Dairy Res. 2022 Nov;89(4):413-415.

14. Cressier B, Bissonnette N. Assessment of an extraction protocol to detect the major mastitis-causing pathogens in bovine milk. J Dairy Sci. 2011;94(5):2171-2184.

15. Wu X, Liu J, Feng J, Shabbir MAB, Feng Y, Guo R, Zhou M, Hou S, Wang G, Hao H, Cheng G, Wang Y. Epidemiology, environmental risks, virulence, and resistance determinants of *Klebsiella pneumoniae* from dairy cows in Hubei, China. Front Microbiol. 2022;13:858799.

16. Wilson DJ, Mallard BA, Burton JL, Schukken YH, Grohn YT. Association of *Escherichia coli* J5-specific serum antibody responses with clinical mastitis outcome for J5 vaccinate and control dairy cattle. Clin Vaccine Immunol. 2009;16(2):209-217.

17. Godden SM, Royster E. Bedding Management with a view to promoting udder health. Vet Clin North Am Food Anim Pract. 2025;41(2):237-248.

18. Pyörälä S, Taponen S. Coagulase-negative staphylococci-emerging mastitis pathogens. Vet Microbiol. 2009;134(1-2):3-8.

19. Rowe S, Kabera F, Dufour S, Godden S, Roy JP, Nydam D. Selective dry-cow therapy can be implemented successfully in cows of all milk production levels. J Dairy Sci. 2023;106(3):1953-1967.

20. Johler S, Layer F, Stephan R. Comparison of virulence and antibiotic resistance genes of food poisoning outbreak isolates of *Staphylococcus aureus* with isolates obtained from bovine mastitis milk and pig carcasses. J Food Prot. 2011;74(11):1852-1859.

21. G Abril A, G Villa T, Barros-Velázquez J, Cañas B, Sánchez-Pérez A, Calo-Mata P, Carrera M. *Staphylococcus aureus* exotoxins and their detection in the dairy industry and mastitis. Toxins (Basel). 2020;12(9):537.

22. Ozbey G, Cambay Z, Yilmaz S, Aytekin O, Zigo F, Ozçelik M, Otlu B. Identification of bacterial species in milk by MALDI-TOF and assessment of some oxidant-antioxidant parameters in blood and milk from cows with different health status of the udder. Pol J Vet Sci. 2022;25(2):269-277.

23. Pizauro LJL, de Almeida CC, Soltes GA, Slavic D, de Ávila FA, Zafalon LF, MacInnes JI. Short communication: Detection of antibiotic resistance, mecA, and virulence genes in coagulase-negative Staphylococcus spp. from buffalo milk and the milking environment. J Dairy Sci. 2019;102(12):11459-11464.

24. Torres G, Macias D, Reyes-Vélez J, Rios-Agudelo P, Caraballo-Guzmán A. *Streptococcus agalactiae* virulence factors isolated from bovine mastitis and antibiotic treatment response. J Appl Microbiol. 2023;134(6):lxad116.

25. Royster E, Wagner S. Treatment of mastitis in cattle. Vet Clin North Am Food Anim Pract. 2015;31(1):17-46, v.

26. Oliver SP, Boor KJ, Murphy SC, Murinda SE. Food safety hazards associated with consumption of raw milk. Foodborne Pathog Dis. 2009;6(7):793-806.

27. Lorusso A, Addante L, Capozzi L, Bianco A, Del Sambro L, Gallitelli ME, Parisi A. Isolation of *Yersinia pseudotuberculosis* in bovine mastitis: A potential milk-borne hazard. Ital J Food Saf. 2021;9(4):8527.

28. Dong L, Meng L, Liu H, Wu H, Hu H, Zheng N, Wang J, Schroyen M. Effect of therapeutic administration of β-lactam antibiotics on the bacterial community and antibiotic resistance patterns in milk. J Dairy Sci. 2021;104(6):7018-7025.

29. Codex Alimentarius Commission (2024). Maximum residue limits for milk, Rome, Italy, https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/pestres/en/

30. Ministry of Food and Drug Safety (2024), Raw milk and dairy product hygiene management guidelines, Sejong, South Korea, https://www.mfds.go.kr/brd/m_218/view.do?seq=33566

31. Chen H, Weersink A, Kelton D, von Massow M. Estimating milk loss based on somatic cell count at the cow and herd level. J Dairy Sci. 2021;104(7):7919-7931.

32. Anglart D, Hallén-Sandgren C, Emanuelson U, Rönnegård L. Comparison of methods for predicting cow composite somatic cell counts. J Dairy Sci. 2020;103(9):8433-8442.

33. Pakrashi A, Ryan C, Guéret C, Berry DP, Corcoran M, Keane MT, Mac Namee B. Early detection of subclinical mastitis in lactating dairy cows using cow-level features. J Dairy Sci. 2023;106(7):4978-4990.

34. El-Sayed A, Kamel M. Bovine mastitis prevention and control in the post-antibiotic era. Trop Anim Health Prod. 2021;53(2):236.

35. Ma Y, Klontz KC, DiNovi MJ, Edwards AJ, Hennes RF. Evaluation of the level of food safety protection provided by the U.S. grade "A" pasteurized milk ordinance and its associated cooperative grade "A" milk safety program. J Food Prot. 2015;78(8):1428-1433.

36. Byrne B, Dunne G, Lyng J, Bolton DJ. The development of a 'clean sheep policy' in compliance with the new Hygiene Regulation (EC) 853/2004 (Hygiene 2). Food Microbiol. 2007;24(3):301-304.

37. World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023), Food safety is everyone's business in the primary production of milk, Geneva, Switzerland, https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-NFS-AFS-2023.2

38. Akaike H, Nagai M, Okatani AT, Morita Y. Food safety, livestock health, and productivity of a dairy farm following implementation of a certificated Hazard Analysis and Critical Control Points system. J Vet Med Sci. 2022;84(7):924-928.

39. Okella H, Tonooka K, Okello E. A Systematic review of the recent techniques commonly used in the diagnosis of *Mycoplasma bovis* in dairy cattle. Pathogens. 2023;12(9):1178.

40. Michie C, Andonovic I, Davison C, Hamilton A, Tachtatzis C, Jonsson N, Duthie CA, Bowen J, Gilroy M. The Internet of Things enhancing animal welfare and farm operational efficiency. J Dairy Res. 2020;87(S1):20-27.

41. D'Anvers L, Adriaens I, Piepers S, Gote MJ, De

Ketelaere B, Aernouts B. Association between management practices and estimated mastitis incidence and milk losses on robotic dairy farms. Prev Vet Med. 2023;220:106033.

42. Cho HS, Kim D, Jeon H, Somasundaram P, Soundrarajan N, Park C. Bactericidal activities and biochemical features of 16 antimicrobial peptides against bovine-mastitis causative pathogens. Vet Res. 2024;55(1):150.

43. Maalaoui A, Trimeche A, Marnet PG. Alternative approaches to antibiotics in the control of mastitis in dairy cows: a review. Vet Res Commun. 2025;49(3):150.

44. Sánchez-Castro MA, Vukasinovic N, Passafaro TL, Salmon SA, Asper DJ, Moulin V, Nkrumah JD. Effects of a mastitis J5 bacterin vaccination on the productive performance of dairy cows: An observational study using propensity score matching techniques. J Dairy Sci. 2023;106(10):7177-7190.

45. Jiang L, Li Q, Liao H, Liu H, Wang Z. Enhancing agricultural productivity in dairy cow mastitis management: Innovations in non-antibiotic treatment technologies. Vet Sci. 2025;12(7):662.

46. Ut ID, Berean DI, Bogdan LM, Ciupe S, Gog Bogdan S. Selective dry cow therapy in modern dairy management: Balancing udder health and antimicrobial stewardship. Vet Sci. 2025;12(6):580.

47. Sindhu S, Saini T, Rawat HK, Chahar M, Grover A, Ahmad S, Mohan H. Beyond conventional antibiotics approaches: Global perspectives on alternative therapeutics including herbal prevention, and proactive management strategies in bovine mastitis. Microb Pathog. 2024;196:106989.