

Quality Management of Blood Culture Testing: Reducing Contamination and Improving Outcomes

Min Hyuk Choi^{ID}, Dokyun Kim^{ID}, Jihoon Yoon^{ID}, and Seok Hoon Jeong^{ID}

Department of Laboratory Medicine and Research Institute of Bacterial Resistance, Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Corresponding author:

Seok Hoon Jeong
Department of Laboratory Medicine
and Research Institute of Bacterial
Resistance, Gangnam Severance
Hospital, Yonsei University College of
Medicine, 211 Eonju-ro, Gangnam-gu,
Seoul 06273, Korea
Tel +82-2-2019-2776
E-mail kscpjsh@yuhs.ac

Received: October 15, 2024

Revised: December 11, 2024

Accepted: June 10, 2025

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Blood cultures are an important diagnostic tool for identifying bloodstream infections. They provide information on the identification of pathogens and antibiotic susceptibility to guide appropriate antimicrobial therapy and patient management. Inappropriate blood culture practices can lead to false positive/false negative test results, resulting in unnecessary use of antibiotics, delays in treatment, and increased duration of hospitalization. Therefore, effective quality control measures are necessary to ensure the reliability of results and to minimize risk. This review focuses on key quality control elements of blood cultures, including appropriate indications for blood culture testing, optimal timing, sampling intervals (consecutive sampling vs. timed interval sampling), blood volume required, aseptic sampling, and contamination reduction strategies. Appropriate blood volume collection and standardized procedures are critical to reduce contamination rates, which can be achieved through systematic training of healthcare personnel and continuous monitoring. Technological advances, such as automated blood culture systems, rapid diagnostic panels, and artificial intelligence for optimizing data interpretation and clinical decision support, can also improve the accuracy and efficiency of diagnosis. It is essential to maintain high quality standards and use technological advances in blood culture practices to improve diagnostic results and patient outcomes, and ultimately support appropriate and timely treatment decisions.

(Lab Med Qual Assur 2025;47:86-92)

Key Words Blood culture, Quality control, Specimen handling, Bloodstream infection

서론

혈액배양(blood culture)은 패혈증을 포함한 다양한 혈류 감염을 신속하고 정확하게 진단하는 데 필수적인 도구다[1-4]. 병원체의 동정과 항생제 감수성 검사 결과를 제공해, 적절한 항생제 선택과 치료 전략 수립 및 환자 예후 예측을 가능하게 한다[5]. 하지만

혈액배양 검사가 부정확하게 수행되면 오염된 결과가 발생할 수 있으며, 이는 항생제 오남용, 환자 치료 지연, 병원 체류 기간의 연장 등 부정적 결과를 초래할 수 있다[5-8]. 따라서, 정확한 혈액배양 검사를 수행하기 위한 정도관리가 필수적이다. 채혈량, 채취 빈도와 방법, 배양 병의 적절한 선택, 자동화 혈액배양 검출 시스템의 사용 여부, 항생제 투약의 과거력, 환자의 상태 및 채혈 후 검체

처리 시간과 같은 다양한 요소가 혈액배양 검출률에 영향을 줄 수 있다.

혈액배양의 정도관리

1. 혈액배양의 적응증

혈류감염의 위험이 낮은 환자에서 과도한 혈액배양 검사를 시행하면, 피부 상재균의 반복 검출이나 환자의 증상과 직접적인 관련이 없는 양성 결과로 인해 혈류 감염 가능성이 과대평가될 수 있으므로 검사 적응증에 대한 구체적 지침이 필요하다[9]. Table 1에는 환자 상태에 따른 혈류감염 발생의 위험성을 표기하였다[2,10-16]. 중등도(moderate) 이상의 위험도를 가진 환자들이 일반적으로 혈액배양 검사의 적응증이 된다[2,10,11]. 패혈증 징후와 증상이 있는 환자의 경우, 항균제를 투여 전 가능한 빨리 두 세트의 혈액배양 검사를 받아야 하며, 심내막염이 의심되는 환자에서는 세 세트의 혈액배양이 추천된다[12]. 동반된 위험 요소가 없는 단순 피부 및 연조직 감염이 있는 환자에서는 혈액배양이 필요하지 않다[13,14]. 이미 항균제 투여를 받은 환자에서는, 증상만으로는 혈류감염을 예측할 수 없다[15,16]. 그러나 발열이 다른 요인(예, 백혈구 증가증)과 동반되거나 균혈증 발생 빈도가 높은 기저질환이 있는 환자에게서 발생한 경우 혈액배양의 양성 확률이 높다[2]. 지역사회 획득 폐렴이 있는 환자에서의 혈액배양은, 고령 또는 면역저하환자, 영상의학적 삼출 또는 농흉 등과 같은 동반 징후가 있는 환자에게서만 권장된다[17,18].

2. 검체 채취 시기

과거에는 혈액배양을 위한 검체를 30-60분 사이의 임의의 간격으로 채혈하는 것이 일반적이었다. 그러나 검체 채취에 시간에 간격을 두는 것과 그렇지 않은 것 사이에는 검출률에 차이가 없는 것으로 밝혀졌다[19]. 또한 환자의 발열 시점에 채혈을 하는 것도 검사 결과에 유의미한 영향을 미치지 못하였다[16,19]. 따라서, 일반적인 혈액배양을 위한 검체는 동시 또는 짧은 시간 간격으로 채취하는 것이 업무량 감소를 위해 추천된다. 감염성 심내막염이나 카테터연관 혈류감염과 같은 혈관 내 감염이 의심되는 환자에서 지속적 균혈증 확인이 필요할 경우에만, 시간 간격을 둔 채혈이 요구된다.

3. 검체 양과 수

혈액량은 성인에서의 혈액배양 검사 양성률에 유의미한 영향을 미치며, 충분한 혈액량을 채취하면 감염 원인을 보다 빠르게 검출하여 환자 치료에 도움을 줄 수 있다[19,20]. 소아 환자에 대한 데이터는 제한적이지만, 혈액 내 세균 수를 관찰한 연구들에 따르면, 적은 수의 세균이 포함된 혈액을 더 많은 양으로 배양할 경우 병원체 검출률이 향상된 점이 확인되었다[21,22].

성인의 경우, 각 세트당 20-30 mL의 혈액을 채취하는 것이 권장된다. 소아의 경우, 환자 안전을 위해 채혈은 환자 혈액량의 1%를 초과하지 않아야 하며, 일반적으로는 한 세트당 2-4 mL의 혈액을 채취한다[23-26]. 성인과 소아 모두에서 단일 혈액배양 세트의 결과는 양성률이 떨어지고, 오염에 대한 판단이 어려우므로 추천되지 않는다. 항균제 치료를 시작 후, 미생물이 즉시 멸균되지는

Table 1. Risk of bloodstream infection according to patient condition

Bacteremia risk	Prevalence (%)	Conditions
Very low	<5	Fever within 24 hours post-surgery Isolated fever without other symptoms
Low	5-10	Uncomplicated cellulitis Uncomplicated pneumonia Lower urinary tract infection
Low-moderate	10-20	Cellulitis in critically ill patients Ventilator-associated pneumonia
Moderate	20-50	Acute pyelonephritis Cholangitis Pyogenic liver abscess Complicated pneumonia Sepsis Non-vascular shunt infection
High	>50	Vertebral osteomyelitis Epidural abscess, meningitis Acute nontraumatic native septic joints Ventriculoatrial shunt infection Septic shock

않으므로 후속 혈액배양 검사는 초기 검체 세트를 얻은 후 2-5일의 간격을 두어야 하며, 그 사이에 반복해서는 안 된다. 대부분의 균혈증은 호기성 세균에 의해 발생하므로 배양을 위해 권장되는 혈액량보다 적은 양의 혈액이 채취된 경우, 먼저 호기성 병에 혈액을 접종하고 남은 혈액은 혐기성 병에 접종해야 한다. 자동화 혈액배양 검출 시스템을 사용하는 경우, 수기법에 비해 검출률이 높아질 뿐만 아니라 결과의 모니터링이 쉽고 미생물 성장을 더 빠르게 감지할 수 있다.

한국의 9개 대학병원에서 수행된 연구에 따르면, 대부분의 병원이 성인에게는 2세트, 소아에게는 1세트의 혈액배양을 시행하였다[27]. 실제 임상 환경에서는 다양한 이유로 혈액 채취 권장량을 지키지 못하는 경우가 많았고, 세트당 평균 채혈량은 성인에선 7.7 mL, 소아에선 2.1 mL로 확인되었다. 의뢰된 혈액배양 중 평균 양성률은 8.0%였으며, 피부 상재균의 평균 분리율은 2.1%로 나타났다. 이 연구는 많은 병원이 CLSI 가이드라인을 엄격히 준수하지 않는 것을 지적하며, 품질 관리 강화의 필요성을 강조하고 있다.

4. 표준화된 채취 및 운송 절차

혈액배양의 오염을 줄이기 위해 피부 소독과 무균적 채혈이 중요하다. 정맥천자를 실시하기 직전에 혈액배양병 또는 배기 튜브의 고무 격막을 70% 이소프로필 알코올로 문질러 소독한 후 건조시켜야 한다. 채취 부위는 2% 알코올성 클로르헥시딘 또는 알코올성 요오드 함유 제제로 30초 이상 소독해야 하며, 알코올이 포함되지 않은 요오드 톱크 또는 포비돈 요오드 제제는 권장되지 않는다[1,28] 이는 혈액배양 오염 방지를 위한 피부 소독제의 효능을 평가한 메타분석결과에서 알코올성 제제의 사용이 포비돈 제제보다 혈액배양 오염률이 더 낮은 것으로 보고된 것에 기반한다[28].

검체는 채취 후 가능한 한 빨리 (2시간 이내) 실온에서 실험실로 운반해야 한다. 특히 35-37°C에서 배양하는 경우 혈액배양 병을 배양기에 넣는 것이 지연되면 성장 감지가 느려지거나 방해될 수 있다[5,20].

5. 오염률 감소를 줄이기 위한 다각적 접근법

혈액배양 오염률은 3% 이하로 유지하는 것이 이상적이며 이를 위해 검체 채취 과정의 정도 관리가 필요하다[2]. 스웨덴의 한 병원에서는 간호사와 보조 간호사들을 대상으로 피부 소독 및 채혈 절차에 대한 교육을 실시하여 오염률을 2.59%에서 2.23%로 낮추었다[29]. 교육은 장기적인 습관 형성을 유도하는 방향으로 설계되어야 한다. 정기적인 워크숍과 모의 훈련이 장기적인 오염률 감소에 기여할 수 있으며, 이를 통해 병원 내 모든 직원들이 일관된 수준의 무균 기술을 유지하도록 해야 한다.

초기 혈액 샘플을 폐기하는 방법(initial specimen diversion technique, ISDT)을 사용하여 오염률을 5%에서 1.6%로 감소시킨 연구도 보고되었다[30-32]. ISDT는 채혈 시 처음 나오는 혈액 일부를 폐기함으로써, 주사바늘 삽입 과정에서 피부에 존재하던 미생물이 혈액배양 병에 들어가는 것을 방지하는 방법이다. 이러한 기법은 특히 피부의 정상 세균총이 혈액배양 결과에 영향을 줄 가능성을 줄여준다. 하지만, ISDT를 도입하기 위해선 표준 채혈 절차 변경과 추가 교육이 필요하므로, 실제 적용이 어려울 수 있다. 또한 신생아를 포함하여 채혈량이 매우 적은 환자의 경우 ISDT의 적용이 어렵다. 전문화된 채혈팀을 통한 검체 채취는 전반적인 혈액 채취 과정을 효율적으로 관리할 수 있어, 혈액배양 오염률 감소에 효과적인 운용법이다[1].

6. 배양 기간

자동 혈액배양 시스템을 사용할 경우 표준 배양 기간은 5일이다. 최신 자동화 혈액배양 검출 시스템은 HACEK (*Haemophilus*, *Aggregatibacter*, *Cardiobacterium*, *Eikenella*, *Kingella*) 그룹과 같은 까다로운 병원체도 동일하게 5일 이내에 검출할 수 있다[33,34]. 병원성 세균과 진균의 95-97%는 자동 혈액배양 시스템으로 배양하는데 3-4일이면 충분한 것으로 나타났다[35]. 연장 배양이 필요한 대표적인 균 종을 Table 2에 정리하였다[33-35].

7. 그람 염색

여러 연구에 따르면 그람 염색 결과를 하루 24시간, 주 7일 보고하는 것이 항균제 조정의 빈도와 적시성을 높이고 환자 치료 결과를 개선한다[36,37]. 그람 염색 결과를 동반하지 않고 병을 '성장 양성'으로 보고하는 것은 권장되지 않는다.

8. 오염률 모니터링

일반적으로 여겨지는 병원균과 오염균에 대한 분류를 Table 3에 나타냈다[38]. 2개 이상의 검체에서 동일균이 반복배양되거나 균혈증의 임상적인 증상(38°C 이상의 발열, 오한, 저혈압 등)이 다른 이유 없이 동반된 경우 오염균에 속하는 균일지라도 병원균에 해당될 수 있다. 하지만 검사실에서 모든 환자의 임상적인 증상을 검토할 수는 없으므로, 일반적으로는 24시간 이내에 연속적으로

Table 2. Bacteria requiring prolonged culture

Bacteria	No. of days of incubation
<i>Legionella</i> , <i>Francisella</i>	Maximum 7 days
<i>Brucella</i>	21 days
Mycobacteria	28 days

Table 3. Clinical significance of organisms isolated from blood cultures

Classification	Microorganisms
Always has clinical significance	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Streptococcus pneumoniae</i> Group A <i>Streptococcus</i> <i>Haemophilus influenzae</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Enterobacteriaceae Bacteroidaceae <i>Candida</i> species
Significant or reflects contamination	Enterococci Viridans streptococci
Occasional contamination	Coagulase-negative staphylococci (other than <i>S. lugdunensis</i>) <i>Corynebacterium</i> species (other than <i>C. jeikeium</i> , <i>C. diphtheriae</i>) Diphtheroids <i>Cutibacterium</i> (formerly <i>Propionibacterium</i>) <i>acnes</i> <i>Bacillus</i> species (other than <i>B. anthracis</i>) <i>Micrococcus</i> species

는 수집한 혈액배양 중 한 배양 세트의 한 병 또는 두 병에서만 다음의 미생물이 분리되는 경우를 오염으로 간주한다: coagulase-negative staphylococci (other than *Staphylococcus lugdunensis*), *Corynebacterium* species (other than *C. jeikeium*, *C. diphtheriae*), diphtheroids, *Cutibacterium* (formerly *Propionibacterium*) *acnes*, *Bacillus* species (other than *B. anthracis*), *Micrococcus* species, viridans streptococci [38].

오염률 통계를 주기적으로 분석하는 것이 필요하다. 오염률은 전체 혈액배양 건수를 오염균이 분리된 혈액배양 건수로 나누어 백분율로 환산하며, 3%를 초과하면 혈액채취 과정에 대한 검토와 교육을 포함한 조치가 필요하다[39,40]. 연 1회 이상 적정한 양의 혈액을 채취하는 지와 전체 혈액배양 중 배양 양성률이 8% 이상이 되는 지 감시 기록한다.

9. 혈액배양 검사의 기술적 발전과 정도 관리

혈액배양 검사에서의 기술적 발전은 정도 관리에도 영향을 미치고 있다. 메타유전체 검사는 혈류 감염을 신속하게 감지하고 특성화하기 위해 활용될 수 있다. 이 방법은 혈액 샘플에서 적은 양의 미생물을 검출할 수 하고, 12시간 이내에 결과를 제공할 수 있다[41]. 검사실에서 폭넓게 활용할 수 있는 BIOFIRE blood culture identification (BCID; bioMérieux, Marcy-l'Étoile, France) 과 같은 신속 식별 패널은 양성 혈액배양 샘플에서 세균, 효모 및 항균제 내성 유전자를 신속하게 검출하는 진단 도구이다 [42].

다양한 분야에서 기술 발전을 이끌고 있는 인공지능 기술은 임상미생물 영역에서도 진단 과정을 개선할 수 있다[43,44]. 지도형

인공지능(supervised learning)은 정답이 알려진 데이터를 학습하여 미생물학적 데이터를 해석할 수 있는 모델을 개발하는 데 활용되고 있다. 배양 음성 검체와 양성 검체를 분류하고, 양성 검체에서 오염 여부를 판단하는 데 도움을 줄 수 있다. 비지도식 모델은 정답 레이블이 없는 데이터의 분류하거나 인간이 인식하기 힘든 패턴을 발견하는 데 유용하다. 이미지 기반으로, 배지에서 콜로니 수를 계산하거나, 그람 염색을 판독을 수행하며, 형태학적 분석을 통해 세균의 종 식별이나 디스크 확산 판독을 통한 감수성 검사의 가능성도 보여준다. 인공지능 기술은 혈액배양에서 의료진의 주관적 해석으로 인한 오류를 줄이고, 결과의 표준화를 가능하게 하지만, 이를 구현하는 데에는 여전히 과제가 남아 있다. 연구 영역이 아닌, 실제 임상 환경에서 인공지능을 적용시키기 위해선 다양한 변동성을 반영할 수 있도록 대규모 데이터의 확보와 학습이 필요하다. 또한 식약처 승인의 필요성, 인공지능 시스템을 기존 임상 워크플로우에 통합하는 등의 문제를 해결해야 한다.

결론

혈액배양 검사는 패혈증을 포함한 혈류감염의 신속하고 정확한 진단을 위한 필수적인 도구이며, 적절한 항균제 선택과 환자 치료에 중요한 역할을 한다. 그러나 검사의 정확성을 위해서는 채취량, 채취 시기, 무균적 채혈 방법 등 여러 품질 관리 요소들이 철저히 준수되어야 하며, 특히 오염률 최소화와 검출률을 향상시키기 위한 다각적 접근이 필요하다. 표준화된 절차와 교육을 통해 무균 채혈 기술을 유지하고, 채혈량과 오염률을 지속적으로 모니터링함으로써 정확한 결과를 확보할 수 있다. 더불어, 자동화 혈액배양 검출 시스템과 신속 진단 도구, 인공지능 등의 기술적 발전이 혈액배

양의 정확도와 효율성을 향상시키고 있다. 이와 같은 품질 관리 및 기술적 발전은 환자의 예후 개선을 위한 중요한 기여를 할 것이다.

ORCID

Min Hyuk Choi <https://orcid.org/0000-0001-9801-9874>
 Dokyun Kim <https://orcid.org/0000-0002-0348-5440>
 Jihoon Yoon <https://orcid.org/0000-0002-4401-7803>
 Seok Hoon Jeong <https://orcid.org/0000-0001-9290-897X>

REFERENCES

1. Doern GV, Carroll KC, Diekema DJ, Garey KW, Rupp ME, Weinstein MP, et al. Practical guidance for clinical microbiology laboratories: a comprehensive update on the problem of blood culture contamination and a discussion of methods for addressing the problem. *Clin Microbiol Rev* 2019;33:e00009-19.
2. Fabre V, Sharara SL, Salinas AB, Carroll KC, Desai S, Cosgrove SE. Does this patient need blood cultures?: a scoping review of indications for blood cultures in adult nonneutropenic inpatients. *Clin Infect Dis* 2020;71:1339-47.
3. Garcia RA, Spitzer ED, Beaudry J, Beck C, Diblasi R, Gilleeny-Blabac M, et al. Multidisciplinary team review of best practices for collection and handling of blood cultures to determine effective interventions for increasing the yield of true-positive bacteremias, reducing contamination, and eliminating false-positive central line-associated bloodstream infections. *Am J Infect Control* 2015;43:1222-37.
4. Wilson ML, Weinstein MP, Reller LB. Laboratory detection of bacteremia and fungemia. In: Jorgensen JH, Carroll KC, Funke G, Pfaller MA, Landry ML, Richter SS, editors. *Manual of clinical microbiology*. 11th ed. Washington, DC: ASM Press, 2015:15-28.
5. Weinstein MP, Towns ML, Quartey SM, Mirrett S, Reimer LG, Parmigiani G, et al. The clinical significance of positive blood cultures in the 1990s: a prospective comprehensive evaluation of the microbiology, epidemiology, and outcome of bacteremia and fungemia in adults. *Clin Infect Dis* 1997;24:584-602.
6. Rhee C, Dantes R, Epstein L, Murphy DJ, Seymour CW, Iwashyna TJ, et al. Incidence and trends of sepsis in US hospitals using clinical vs claims data, 2009-2014. *JAMA* 2017;318:1241-9.
7. Clinical and Laboratory Standards Institute. *Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically*. 11th ed. CLSI standard M07. Wayne (PA): Clinical and Laboratory Standards Institute, 2018.
8. Clinical and Laboratory Standards Institute. *Methods for antimicrobial susceptibility testing of anaerobic bacteria*. 9th ed. CLSI standard M11. Wayne (PA): Clinical and Laboratory Standards Institute, 2018.
9. Fabre V, Milstone AM, Keller SC, Carroll KC, Cosgrove SE. Prescribers' knowledge, attitudes and perceptions about blood culturing practices for adult hospitalized patients: a call for action. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2018;39:1394-6.
10. Coburn B, Morris AM, Tomlinson G, Detsky AS. Does this adult patient with suspected bacteremia require blood cultures? *JAMA* 2012;308:502-11.
11. Fu CM, Tseng WP, Chiang WC, Lai MS, Chie WC, Chou HC, et al. Occult *Staphylococcus aureus* bacteremia in adult emergency department patients: rare but important. *Clin Infect Dis* 2012;54:1536-44.
12. Rhodes A, Evans LE, Alhazzani W, Levy MM, Antonelli M, Ferrer R, et al. Surviving sepsis campaign: international guidelines for management of sepsis and septic shock: 2016. *Intensive Care Med* 2017;43:304-77.
13. Astete JA, Batlle A, Hernandez-Bou S, Trenchs V, Gene A, Luaces C. Blood culture diagnostic yield in a paediatric emergency department. *Eur J Emerg Med* 2014;21:336-40.
14. Perl B, Gottehrer NP, Raveh D, Schlesinger Y, Rudensky B, Yinnon AM. Cost-effectiveness of blood cultures for adult

patients with cellulitis. *Clin Infect Dis* 1999;29:1483-8.

15. Linsenmeyer K, Gupta K, Strymish JM, Dhanani M, Brecher SM, Breu AC. Culture if spikes? Indications and yield of blood cultures in hospitalized medical patients. *J Hosp Med* 2016;11:336-40.
16. Riedel S, Bourbeau P, Swartz B, Brecher S, Carroll KC, Stamper PD, et al. Timing of specimen collection for blood cultures from febrile patients with bacteremia. *J Clin Microbiol* 2008;46:1381-5.
17. Heine D, Cochran C, Moore M, Titus MO, Andrews AL. The prevalence of bacteremia in pediatric patients with community-acquired pneumonia: guidelines to reduce the frequency of obtaining blood cultures. *Hosp Pediatr* 2013;3:92-6.
18. Benenson RS, Kepner AM, Pyle DN 2nd, Cavanaugh S. Selective use of blood cultures in emergency department pneumonia patients. *J Emerg Med* 2007;33:1-8.
19. Li J, Plorde JJ, Carlson LG. Effects of volume and periodicity on blood cultures. *J Clin Microbiol* 1994;32:2829-31.
20. Cockerill FR 3rd, Wilson JW, Vetter EA, Goodman KM, Torgerson CA, Harmsen WS, et al. Optimal testing parameters for blood cultures. *Clin Infect Dis* 2004;38:1724-30.
21. Szymczak EG, Barr JT, Durbin WA, Goldmann DA. Evaluation of blood culture procedures in a pediatric hospital. *J Clin Microbiol* 1979;9:88-92.
22. Washington JA 2nd. Conventional approaches to blood culture. In: Washington JA 2nd, editor. *The detection of septicemia*. Boca Raton (FL): CRC Press, 1978:41-87.
23. Miller JM, Binnicker MJ, Campbell S, Carroll KC, Chapin KC, Gilligan PH, et al. A guide to utilization of the microbiology laboratory for diagnosis of infectious diseases: 2018 update by the Infectious Diseases Society of America and the American Society for Microbiology. *Clin Infect Dis* 2018;67:813-6.
24. Riedel S, Carroll KC. Blood cultures: key elements for best practices and future directions. *J Infect Chemother* 2010;16:301-16.
25. Wilson ML. Critical factors in the recovery of pathogenic microorganisms in blood. *Clin Microbiol Infect* 2020;26:174-9.
26. Connell TG, Rele M, Cowley D, Buttery JP, Curtis N. How reliable is a negative blood culture result? Volume of blood submitted for culture in routine practice in a children's hospital. *Pediatrics* 2007;119:891-6.
27. Shin JH, Song SA, Kim MN, Lee NY, Kim EC, Kim S, et al. Comprehensive analysis of blood culture performed at nine university hospitals in Korea. *Korean J Lab Med* 2011;31:101-6.
28. Caldeira D, David C, Sampaio C. Skin antiseptics in venous puncture-site disinfection for prevention of blood culture contamination: systematic review with meta-analysis. *J Hosp Infect* 2011;77:223-32.
29. Roth A, Wiklund AE, Palsson AS, Melander EZ, Wullt M, Cronqvist J, et al. Reducing blood culture contamination by a simple informational intervention. *J Clin Microbiol* 2010;48:4552-8.
30. Arenas M, Boseman GM, Coppin JD, Lukey J, Jinadatha C, Navarathna DH. Asynchronous testing of 2 specimen-diversion devices to reduce blood culture contamination: a single-site product supply quality improvement project. *J Emerg Nurs* 2021;47:256-64.
31. Bell M, Bogar C, Plante J, Rasmussen K, Winters S. Effectiveness of a novel specimen collection system in reducing blood culture contamination rates. *J Emerg Nurs* 2018;44:570-5.
32. Geisler BP, Jilg N, Patton RG, Pietzsch JB. Model to evaluate the impact of hospital-based interventions targeting false-positive blood cultures on economic and clinical outcomes. *J Hosp Infect* 2019;102:438-44.
33. Bourbeau PP, Pohlman JK. Three days of incubation may be sufficient for routine blood cultures with BacT/Alert FAN blood culture bottles. *J Clin Microbiol* 2001;39:2079-82.
34. Han XY, Truant AL. The detection of positive blood cultures by the AccuMed ESP-384 system: the clinical significance

- of three-day testing. *Diagn Microbiol Infect Dis* 1999;33:1-6.
35. Weinstein MP, Doern GV. A critical appraisal of the role of the clinical microbiology laboratory in the diagnosis of bloodstream infections. *J Clin Microbiol* 2011;49(9 Suppl):S26-29.
 36. Barenfanger J, Graham DR, Kolluri L, Sangwan G, Lawhorn J, Drake CA, et al. Decreased mortality associated with prompt Gram staining of blood cultures. *Am J Clin Pathol* 2008;130:870-6.
 37. Gehring T, Kim H, Hoerauf A, Buechler C. A prospective study on the effect of time-shifted telephone reporting of blood culture microscopy. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis* 2019;38:973-5.
 38. Bekeris LG, Tworek JA, Walsh MK, Valenstein PN. Trends in blood culture contamination: a College of American Pathologists Q-Tracks study of 356 institutions. *Arch Pathol Lab Med* 2005;129:1222-5.
 39. Towns ML, Jarvis WR, Hsueh PR. Guidelines on blood cultures. *J Microbiol Immunol Infect* 2010;43:347-9.
 40. Shin JH, Song SA, Kim MN, Kim, S. Nationwide survey of blood culture performance regarding skin disinfection, blood collection and laboratory procedure. *Korean J Clin Microbiol* 2011;14:91-6.
 41. Moragues-Solanas L, Le-Viet T, McSorley E, Halford C, Lockhart DS, Aydin A, et al. Development and proof-of-concept demonstration of a clinical metagenomics method for the rapid detection of bloodstream infection. *BMC Med Genomics* 2024;17:71.
 42. Rhoads DD, Pournaras S, Leber A, Balada-Llasat JM, Harrington A, Sambri V, et al. Multicenter evaluation of the BIOFIRE blood culture identification 2 panel for detection of bacteria, yeasts, and antimicrobial resistance genes in positive blood culture samples. *J Clin Microbiol* 2023;61:e0189122.
 43. Garnica O, Ruiz-Giardin JM, Hidalgo JI. Artificial intelligence-based predictive, preventive, and personalised medicine applied to bacteraemia diagnosis. In: Boyko N, Golubnitschaja O, editors. *Microbiome in 3p medicine strategies: the first exploitation guide*. Cham: Springer International Publishing, 2023:9-41.
 44. McFadden BR, Inglis TJ, Reynolds M. Machine learning pipeline for blood culture outcome prediction using Sysmex XN-2000 blood sample results in Western Australia. *BMC Infect Dis* 2023;23:552.