

대형 링단조품의 결함원인 분석 및 대책

진상욱¹, 이영선², 김상식^{1#}

Failure Analysis of Large Ring Forged Products

S. U. Jin¹, Y. S. Lee², S. S. Kim^{1#}

Abstract

In this study, the importance of failure analysis on large ring forged products was assessed and the process and methodology were introduced. Failure analysis case study of the large ring forged steel product with approximately 10 mm long internal crack found by non-destructive test (NDT) was presented. The micrographic and fractographic observations and the verifying tests were conducted on the cracked specimen to identify the possible metallurgical reason for the defects, and the metallurgical aspects of internal crack formation were discussed.

Key Words : Failure analysis, large ring forged product, Non-metallic inclusion

1. 서론

최근 기계구조물의 대형화 추세와 더불어 구조물의 주요 부품으로써 대형단조품에 대한 높은 건전성이 요구되어지고 있다. 최근에 대형단조품에 대한 제조기술의 개선에 따라 품질향상이 꾸준히 이루어지고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 대형단조품에서 발행하는 결함의 검출을 위한 비파괴검사 기술과 결함 발생의 원인과 대책에 관한 금속학적 연구에 대한 필요성이 증대되고 있다. 단조품의 결함은 크게 소재결함과 단조결함으로 분류할 수 있으며, 상대적으로 연구가 용이한 소형단조품의 결함에 관한 연구는 다수 보고되어 있다[1~3]. 그러나 대형단조품의 경우에는 높은 제품 단가와 크기의 제약으로 인해 결함에 관한 분석과 대책이 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다 [4,5]. 이러한 주요 부품으로써의 대형단조품에 대한 각종 소재적 또는 공정적 결함들에 대한 원인 분석은 궁극적으로 대형구조물의 품질 및 신뢰성 향상을 위해 필수적으로 행해져야 할 연구인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 대형 링단조품에서 발생된 결함에 관한 분석 사례들을 소개하고 이에 대한 금속학적 원인에 관하여 논하고자 한다. 이를 위해 결함 부위에 대한 거시 및 미시적 조직 관찰과 기본적인 분석기법의 적용을 통해 결함원인을 금속학적으로 분석하고, 가공방법 및 운용환경 개선 등의 방법론을 제시하고자 한다.

1. 경상대학교 나노신소재공학부, 공학연구원, i-큐브 소재·부품 인력양성사업단
2. 한국재료연구소 소성응용연구그룹
교신저자, E-mail: sang@gnu.ac.kr

2. 연구방법

대형 링단조품은 50톤 이상의 대형 단조용 잉고트를 이용하여 고온에서 상당한 시간 동안 단조과정을 거쳐 제품을 완성하게 된다. 대형 단조용 잉고트의 경우 크기적인 제약으로 인해 금속학적 결함이 발생할 가능성이 높다[7]. 또한 단조 후에 소재의 각 부위별로 온도의 편차가 발생하게 되고 이러한 열확산의 차이에 의해 특정 부위에 편석대가 발생하여 결함의 원인으로 작용하는 경우가 발생하기도 한다[2,7,8]

본 연구에서는 A사에서 제조한 석유화학플랜트에 사용되는 단조압력용기(forged shell)용 대형 링단조품에서 발생한 결함분석사례를 소개하고자 한다. 그림 1은 A1520 (0.2C-1.2Mn-0.05P-0.05S) 소재를 사용한 50톤급 대형 링단조품과 초음파탐상 검사를 통해 발견된 균열부 위치를 모식적으로 나타내고 있다. 이 경우 균열은 내경에서 약 60 mm 지점에서 14 mm의 크기로 관찰되었다.

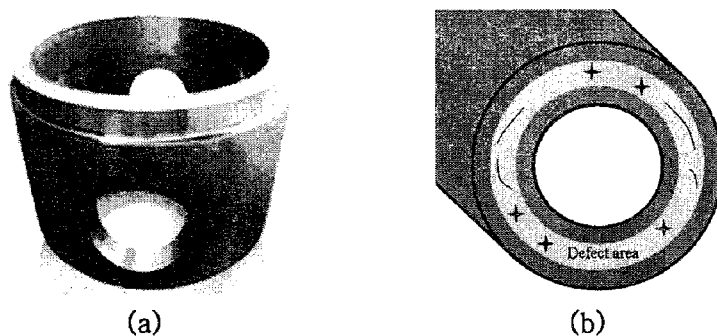


Fig. 1 Photo showing (a) large ring forged product and (b) schematic diagram showing the location where the defects were found.

일반적으로 단조품의 결함에 관한 원인 분석방법은 그 대상물의 운용환경 등의 기초정보 수집, 결함부위 절단, 거시적 관찰, 미시적 관찰, 종합적 분석으로 진행되며, 비파괴분석에서 파괴분석의 순서로 진행된다[4,5]. 즉, 대상물의 파괴 없이 분석이 가능한 부분까지 행한 다음 세부적인 근본 원인을 규명하는 순서로 진행된다. 이러한 결함원인 분석은 해당 분야의 지식과 분석 기술을 바탕으로 전문적 분석기기를 이용하여 진행되는 경우가 많으므로 다양한 금속학적 지식과 분석적 추론 및 결함원인 분석에 대한 경험 등이 요구된다[6].

결함원인의 분석은 결함의 형태나 특성에 따라서 다양한 분석 방법을 적용되며, 본 연구에서는 전술한 방법의 일반적인 수순을 따라 아래와 같이 분석을 진행하였다.

- 1) 운용환경 및 소재 정보 등의 기초자료 수집
- 2) 비파괴검사를 통해 발견된 결함부위 절단
- 3) 결함부의 육안 관찰 및 기록물(사진) 관리 등의 초기 검사
- 4) 결함부 채취 및 세척으로 결함부에 존재하는 이물질 제거
- 4) 주사전자현미경을 이용하여 결함부의 표면/균열/파면 등에 대한 거시적 관찰(저배율→고배율)
- 5) 미시적 관찰(미세조직 등) 및 해석
- 7) 구체적 분석기법 도입(화학성분 분석 등)
- 8) 모사시험을 통한 비교 분석
- 9) 분석 결과에 대한 종합적인 분석 및 결론 도출

결함부의 형태나 특성 또는 의뢰자의 요구에 의하여 5~8 항목은 생략되기도 하며 필요에 따라서는 결함이 발견된 소재에 대한 기초 물성(경도, 인장특성 등)을 확인하는 기계적 시험이 추가되기도 한다.

3. 결과 및 고찰

그림 2(a)에는 비파괴검사를 통해 발견된 결함부위를 절단하여 결함부를 찾아서, 연마 후 에칭하여 광학현미경을 이용하여 관찰한 사진을 나타내었으며, 약 7.54 mm의 균열이 관찰됨을 알 수 있다. 그림2(b)에는 주사전자현미경을 이용하여 미세조직을 관찰한 사진으로 균열주변으로 침상의 베이나이트 조직(acicular bainite band)이 형성되어있음을 알 수 있으며, 침상의 베이나이트 조직 위로 조대한 펄라이트 구조(coarse pearlite structure)가 형성되어 있음을 관찰 할 수 있다. 또한 결함부의 다른 부위에서는 정상적인 펄라이트-페라이트 구조(pearlite-ferrite structure)가 관찰됨을 알 수 있다.

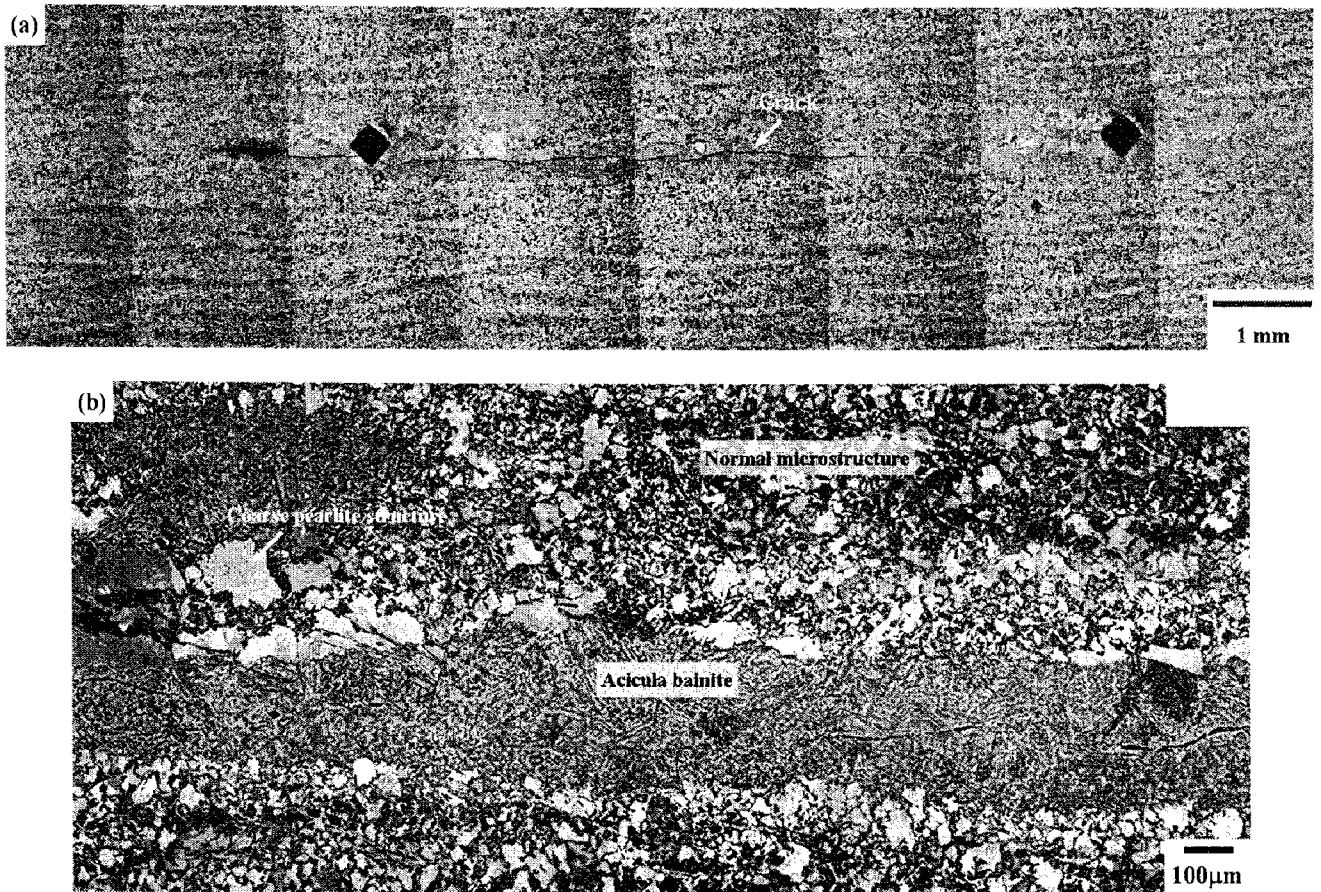


Fig. 2 (a) Optical micrographs and (b) SEM micrographs showing a crack within large ring forged products.

균열부를 SEM을 이용하여 고배율로 관찰한 결과 그림 3에서 보이는 바와 같이 연신된 비금속 개재물을 다수 관찰할 수 있으며, 이러한 비금속 개재물을 그림 4에서 보는 바와 같이 EDS 성분분석한 결과 MnS임을 알 수 있었다. 이전 연구에 의하면 단조용 잉고트의 응고과정에서 생성된 MnS는 소성가공 중 연신되고 응력의 방향에 따라 MnS는 파단되거나 기지와 분리되면서 균열의 원인으로 작용하게 된다[1,7~9].

표면에서 관찰되는 균열부와 비금속개재물의 발생 분포 정도를 정확히 확인하기 위해 인위적으로 파단시킨 시편의 파단면을 그림 5(a)에 나타내었다. 파단면에서도 표면과 동일하게 MnS가 다수 관찰되었으며, 그림 5(b), (c)에서 보는 바와 같이 대부분 클러스터 형태로 존재함을 알 수 있다. 또한 균열의 발생 형태를 보면 이러한 다수의 MnS 클러스터로부터 균열이 발생하여 성장하였음을 알 수 있다.

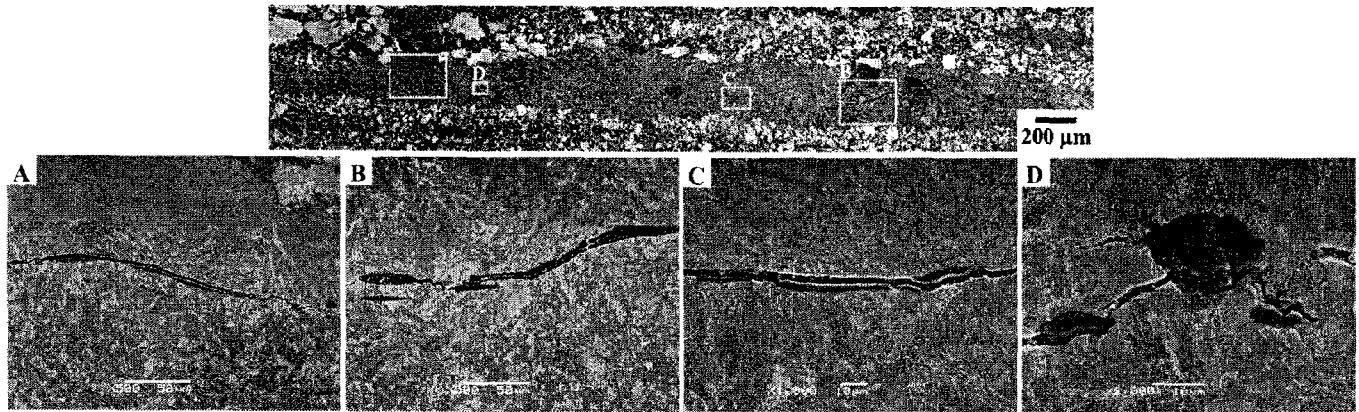


Fig. 3 SEM micrographs showing elongated non-metallic inclusions.

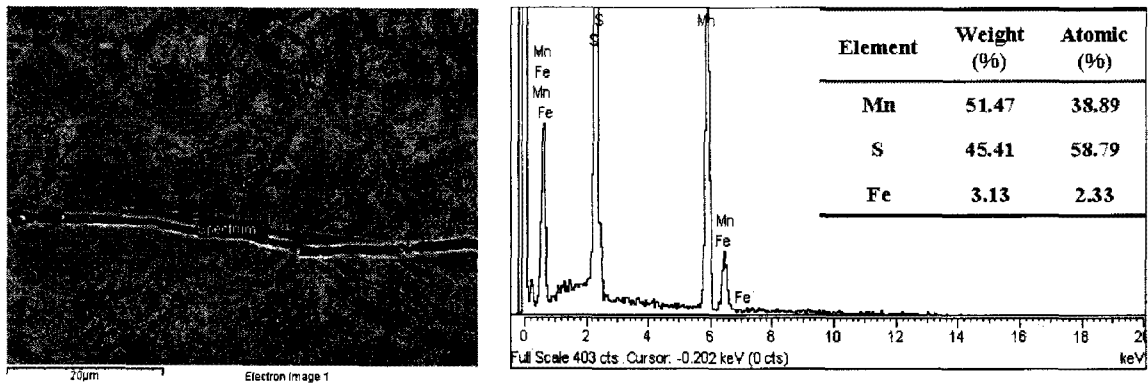


Fig. 4 EDS analysis result for elongated non-metallic inclusion.

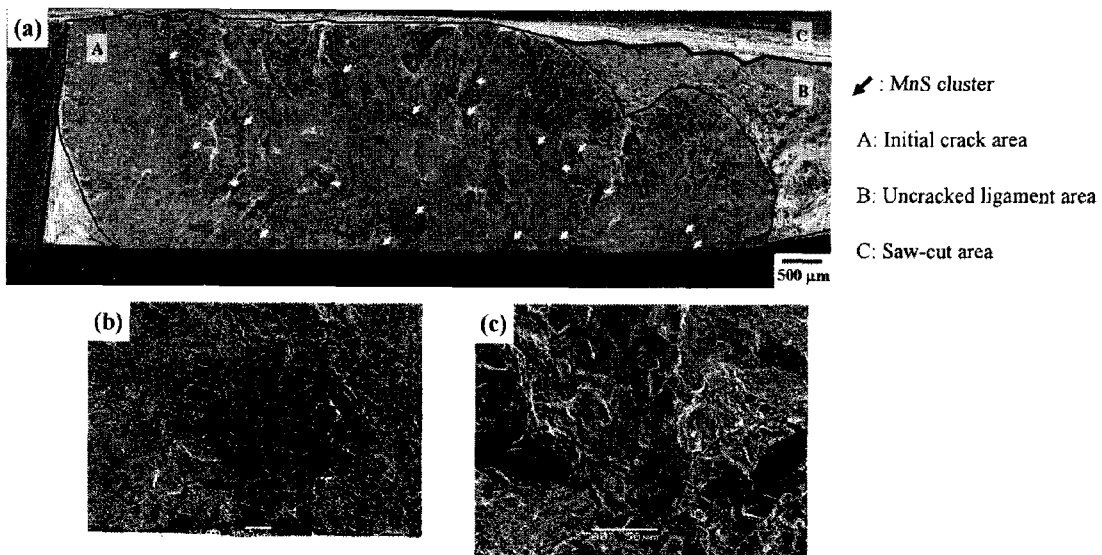


Fig. 5 SEM fractographs showing a large number of MnS clusters on fractured surface.

한편 MnS 이외에 침상의 베이나이트 조직이 생성되는 원인을 알기 위해 단조 후 열처리 공정에서 열처리 전 냉각 온도가 침상의 베이나이트 조직의 형성에 어떤 영향을 미치는지를 모사하는 시험을 통해 조직을 비교하였다. 즉 대형 단조품에서 침상의 베이나이트 조직이 산재해 있는 내경부위와 건전한 외경부위에서 각각 그림 6과 같이 시편을 채취하여, 800, 600, 400, 200°C까지 공냉으로 온도를 낮춘 후 다시 900°C에서 60분간 가열 후 열처리 전과 후의 미세조직을 비교하였다. 단조품의 열처리 조건은 그림 7에 나타내었으며, 그림 8에 외경부에서 채취한 시편에서 각각 냉각온도 조건을 달리하였을 때 시편의 미세조직 사진을 나타내었다. 미세조직 사진에서 보는 바와 같이 온도를 낮출수록 결정립이 더욱 미세화됨을 알 수 있었고, 그림 9에서 보는 바와 같이 침상의 베이나이트 조직의 분포는 냉각온도가 낮아질수록 감소하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 SEM을 이용한 표면 및 파단면 관찰결과, 균열은 연신된 MnS 또는 연신된 MnS 클러스터를 따라 진전되는 것을 확인하였으며, 침상의 베이나이트 조직에서 많이 관찰되는 MnS를 감소시키기 위해서는 열처리전 냉각속도를 약 200°C 이하로 가져가는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

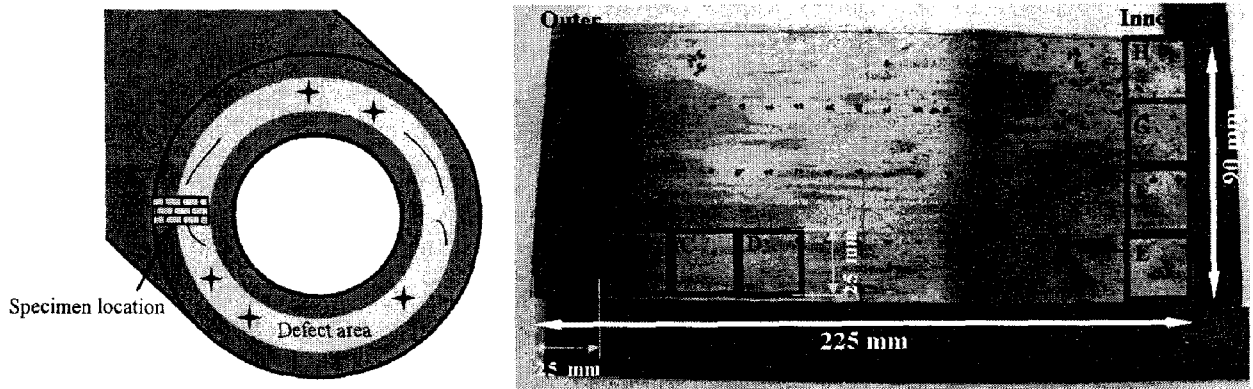


Fig. 6 Schematic diagram for Ring forged product and the location for specimen preparation.

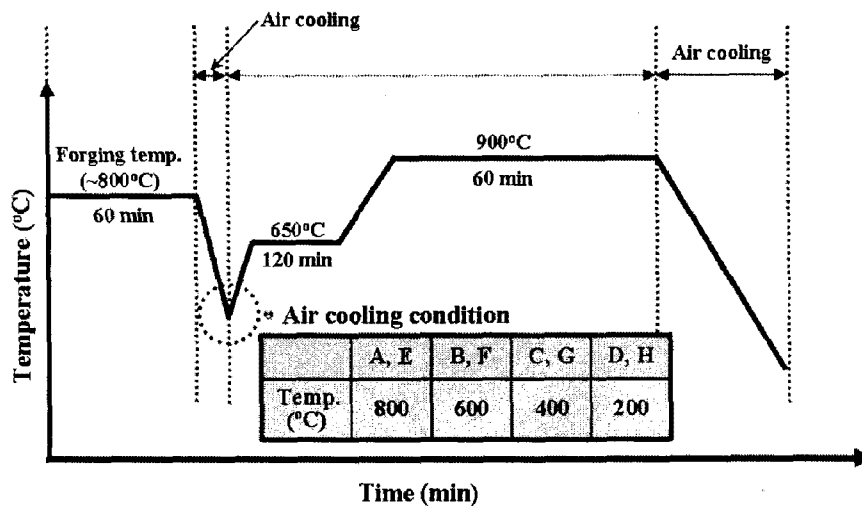


Fig. 7 Heat treatment process for forged specimen.

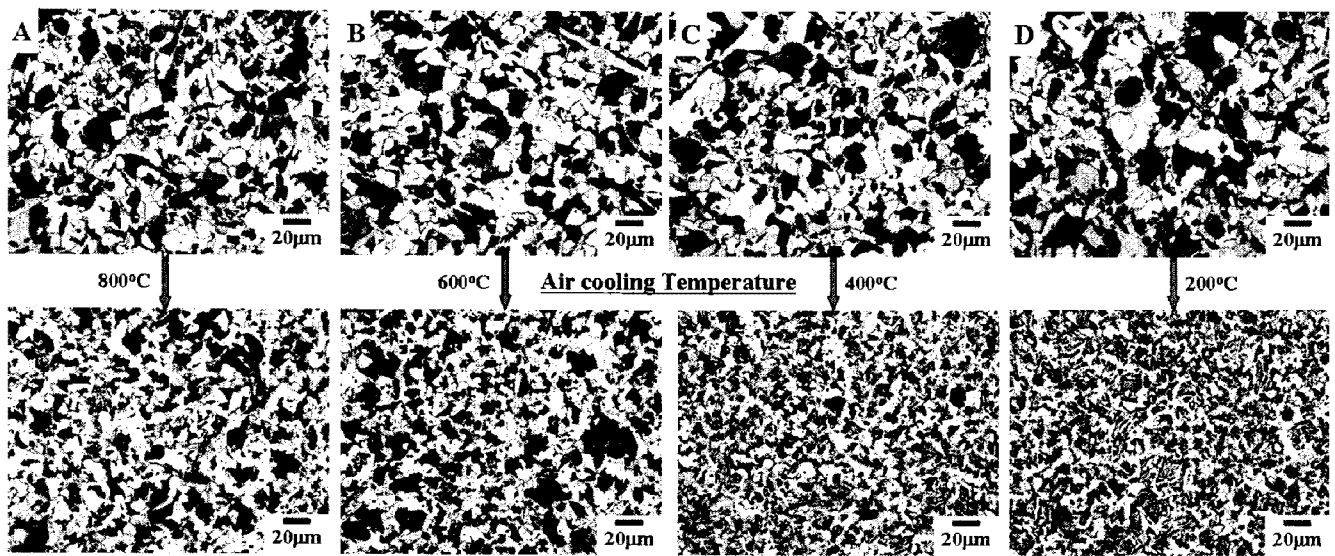


Fig. 8 Optical micrographs of the specimens, prepared from the outer portion of ring forged products and heat treated with different process parameters.

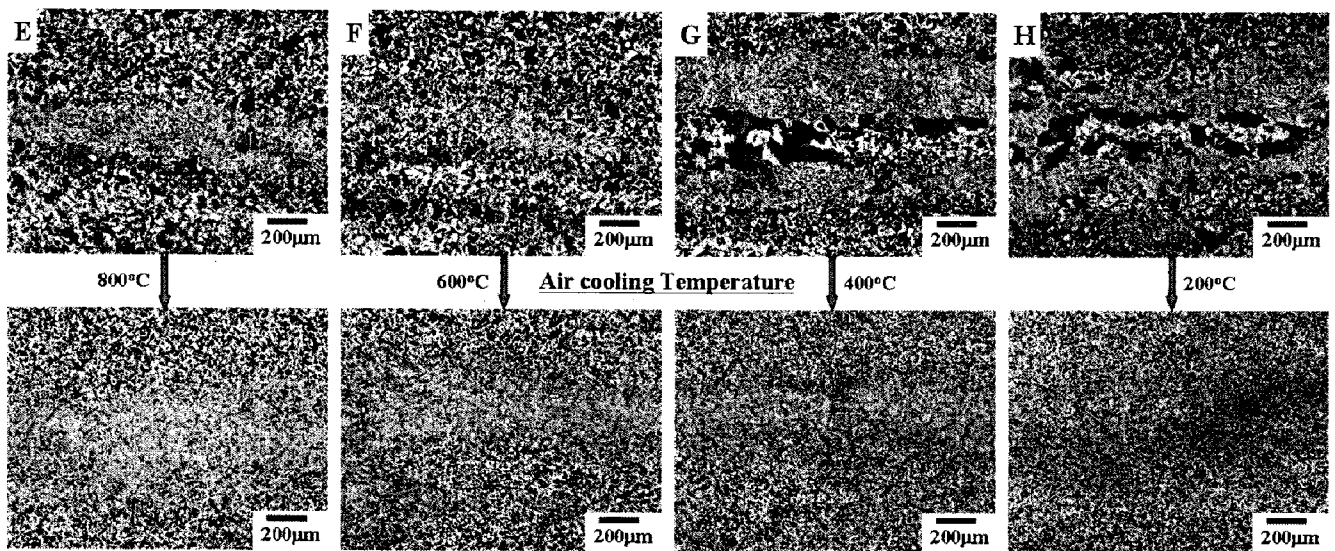


Fig. 9 Optical micrographs of the specimens, prepared from the inner portion of ring forged products and heat treated with different process parameters.

4. 결론

본 연구를 통해 대형 링단조품의 제작 공정에서부터 금속학적, 기계적 및 다양한 환경적 요인 등을 함께 고려하여 종합적인 원인 분석을 합리적으로 수행하는 것이 필수적인 것을 알 수 있었다. 이를 위해서 다양한 대형 링단조품의 제조공정에 관한 배경 정보를 이해하며, 금속학적 및 기계적 특성을 확보하고 평가할 수 있는 기술력 및 경험이 뒷받침 되어야 할 것으로 판단된다. 이처럼 대형 링단조품에서 발생하는 결함의 정확한 금속학적 원인 분석을 통해 대형 단조품의 품질과 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 향후에 유사한 단조품에서 발생할 수 있는 결함발생 사례를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 친환경 고청정 잉곳 제조 및 Near net shape 성형 기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. B. Hosseini, C. Temmel, B. Karlsson, N. G. Ingesten, 2007, In-situ scanning electron microscopy study of the bonding between MnS inclusions and the matrix during tensile deformation of hot-rolled steels, *Metallurgical Materials Transaction A*, Vol. 38A, pp. 982-989.
- [2] N. Tsunekage, H. Tsubakino, 2001, Effects of sulfur content and sulfide-forming elements addition on impact properties of ferrite-pearlitic microalloyed steels, *ISIJ International*, Vol. 41, No. 5, pp. 498~505.
- [3] M. Arentoft, T. Wanheim, 1997, The basis for a design support system to prevent defects in forging, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, pp. 227~232.
- [4] D. A. Ryder, 1995, *Failure Analysis and Prevention*, 9th ed., Metals Handbook, ASM International, USA, Vol. 11, pp. 15~32.
- [5] 이중주, 박신화, 이두면, 2005, 금속재료의 고장분석 및 평가기술, 재료마당, 제18권, 제1호, pp. 27~37.
- [6] 김상식, 장영환, 정유인, 2008, 각종 금속 기계부품의 파손원인 분석 사례, 대한금속재료학회 재료강도심포지엄, 제22회, Session 2-08.
- [7] R. Kiessling, N. Lange, 1978, *Non-metallic inclusions in steel*, 2nd ed., Metals Society, London.
- [8] C. Temmel, B. Karlsson, N. G. Ingesten, 2008, Fatigue crack initiation in hardened medium carbon steel due to manganese sulphide inclusion clusters, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 31, pp. 466-477.
- [9] W. Roberts, B. Lehtinen, An in situ SEM study of void development around inclusions in steel during plastic deformation, *Acta Metallurgical*, Vol. 24, pp. 745~758.