

구상흑연주철 FCD60과 Cr-Mo강 SCM440 확산접합부의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향

송우현* · 김정길* · 강정윤*

*부산대학교 공과대학 재료공학부

The Effect of Bonding Condition on Tensile Properties of Diffusion Bonds of Graphite Cast Iron FCD60 to Cr-Mo Steel SCM440

Woo-Hyun Song*, Jeong-Kil Kim* and Chung-Yun Kang*

*School of Materials Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

The effect of bonding condition on tensile properties of joints diffusion bonded spheroidal graphite cast iron, FCD60 to Cr-Mo steel, SCM 440 was investigated. Diffusion bonding was performed with various temperatures, holding times, pressures and atmospheres.

All tensile specimens were fractured at the bonding interface. The tensile strength and elongation was increased with increasing bonding temperature. Especially, tensile strength of joints bonded at 1123K was higher than that of a raw material, FCD60, and tensile strength of joints bonded at 1173K was equal to that of a raw material, SCM440, but elongation of all joints was lower than those of raw materials. There was little the effect of holding time on the tensile properties. In comparison with bonding atmosphere, the difference of tensile strength was not observed, but elongation of joint bonded at vacuum(6.7mPa and 67mPa) was higher than that of Ar gas. Higher the degree of vacuum, elongation increased. Tensile properties of diffusion bonds depended on microstructures of cast iron at the interface and void ratio. Microstructures of cast iron at interface changed with temperature, because decarburizing and interdiffusion at the interface occurs and transformation of austenite → ferrite + graphite occurs on the cooling process. The void ratio decreased with increasing temperature, especially, effected on the elongation.

* Corresponding author : Kangcy@pusan.ac.kr

(Received January 26, 2004)

Key Words : Cr-Mo steel, Spheroidal graphite cast iron, Diffusion bonding, Temperature, Hoding time, Pressure, microstructure, Tensile property, Void

1. 서 론

확산접합기술은 선진국에서 복잡한 구조를 가진 부품을 제조하는 데에 주로 사용하고 있다. 부품제조 시 확산접합을 채용하는 이유로는 고품질의 제품을 얻기 위해서(35%), 다른 방법으로 제조가 불가능하기 때문에(30%), 생산단가를 저하시키기 위해서(25%), 제품의 중량을 감소시키거나, 기타 이유(10%) 때문인 것으로 알려져 있고, 이러한 장점 때문에 이미 항공기 및

선박엔진 부품에 적용되는 예가 많다¹⁾.

주철은 내마모성이 우수하지만, 가공성과 인성이 나쁘기 때문에 고강도, 고인성 재료와 확산접합으로 복합화하여 새로운 개념의 소재를 개발하거나, 부품제조에 사용되고 있다. 주철과 강의 확산접합에 관한 연구로서는 고Cr주철과 고인성 재료인 주강의 접합²⁾, 회주철과 순철의 접합³⁾이 있다. 특히 구상흑연주철과 탄소강과의 확산접합현상을 체계적으로 연구하여, 주철/탄소강의 클래드 제조 및 자동차부품의 부품 제조에 적용을 시도한 일련의 연구보고⁴⁻⁹⁾도 있다.

선박 엔진의 피스톤의 경우, 구상흑연주철로 제조된 부품과 Cr-Mo강으로 제조된 부품을 서로 볼트로 체결하여 사용되므로, 진동피로에 의한 연소효율의 저하, 부품 수명단축 등의 문제가 대두되고 있다. 본 연구에서는 볼트로 체결하던 것을 확산접합기술을 이용하여 2개의 부품을 접합함으로써, 경량화, 수명연장 및 연소효율의 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단되어, 접합조건에 따른 구상흑연주철과 Cr-Mo강의 확산접합 현상과 접합부의 인장성질을 검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 구상흑연주철, FCD60과 Cr-Mo 구조용강, SCM440의 화학조성을 Table 1에 나타낸다. 조직관찰용 접합시험편은 10mm(Φ) × 10mm(l)로, 인장시험용의 것은 10mm(Φ) × 70mm(l)로 절단하고, 사포(#1000)로 연마하여 사용하였다.

접합은 3K/sec의 승온속도로 원하는 접합온도까지 고주파 가열 유지한 후 로냉시켜 행하였다. 접합온도는 시험편의 접합계면 바로 직하에 열전대를 퍼커션 용접으로 부착하여 제어하고, 측정하였다. 접합온도는 1023K~1273K범위에서 50K 간격으로 변화시켰으며, 유지시간과 접합압력에 대한 예비실험 결과로부터, 유지시간은 1.8ks와 3.6ks로 접합압력은 7MPa과 사용 장치의 최대압력인 11MPa로 변화시켰다. 또한 접합 분위기의 영향은 6.7mPa과 67mPa의 진공분위기와 Ar분위기에 대하여 검토하였다.

접합계면의 보이드율은 SEM 상에서의 3,500배에서 보이드 길이를 측정하고, 20시야에 대한 측정 총길이에 대한 보이드 점유 길이의 비로 평가하였다. 접합부의 인장시험은 크로스헤드 스피드 3.0mm/min의 조건으로 행하였으며, 인장시험편의 형상을 Fig. 1에 나타낸다.

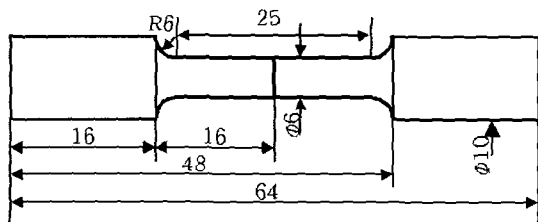


Fig. 1 Shape and dimension of a tensile specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합조건에 따른 보이드율의 변화

Fig. 2는 접합온도에 따른 접합 계면에 형성된 미세조직을 나타낸 것이다. A로 표시된 부분은 미접합된 직선상의 보이드이고, B로 표시된 부분은 피접합면에 돌출된 구상흑연 혹은 흑연이 분쇄되어 피접합면에 나열되어 있는 것으로 생각된다. 접합온도가 낮은 1023K에서는 직선상의 보이드의 점유율이 높고, 계면에 존재하는 흑연도 많지만, 온도가 증가함에 따라서 흑연량과 보이드도 감소하여, 1273K에서는 거의 보이지 않는다.

Fig. 3은 접합온도와 유지시간에 따른 접합계면에 존재하는 직선상 보이드의 점유율을 측정하여 정리한 것이다. 점유율은 측정 길이에 대한 보이드의 장축 길이의 비로 나타내었다. 보이드율은 접합온도가 높을수록 감소하지만, 같은 온도에서 접합시간의 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다. 또한 접합압력의 경우, 압력이 높은 11MPa의 것이 보이드율이 높다. 이것은 계면에서 FCD 60의 피접합면에 흑연이 존재하는 경우, 높은 압력에 의해 흑연이 파쇄되고, 이 흑연분말이 계면에 존재함으로써, 금속 원자끼리 결합이 어렵게 되기 때문에, 압력이 높을수록 오히려 미접합부인 보이드 량이 증가하는 것으로 사료된다. 한편 접합압력이 7MPa보다 낮은 경우에는 소성변형이 잘 일어나지 않아 접합이 잘 되지 않았다.

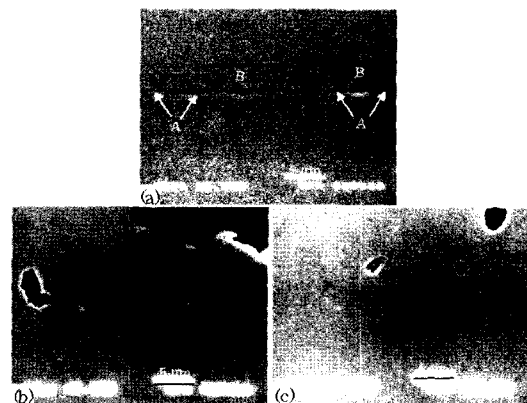


Fig. 2 Microstructures of the bonded interlayer with bonding temperature (7MPa, 1.8ks) (a) 1023K, (b) 1173K, (c) 1273K

Table 1 Chemical compositions of base metals

	c	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Mg	Al	V	Fe
SCM440	0.39	0.22	0.73	0.25	0.07	1.04	0.20	0.15	-	0.22	0.05	bal.
Fcd60	3.68	2.37	0.40	0.027	0.009	-	-	0.57	0.043	-	-	bal.

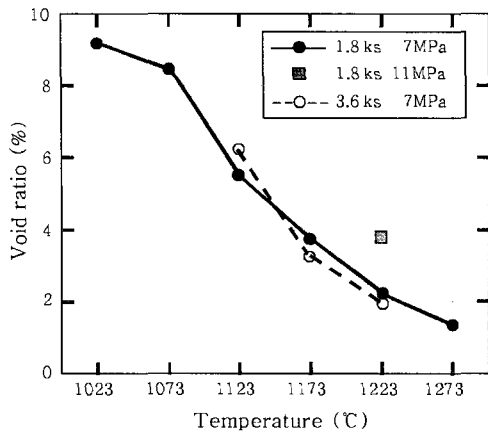


Fig. 3 Effect of bonding temperature and holding time on the void ratio

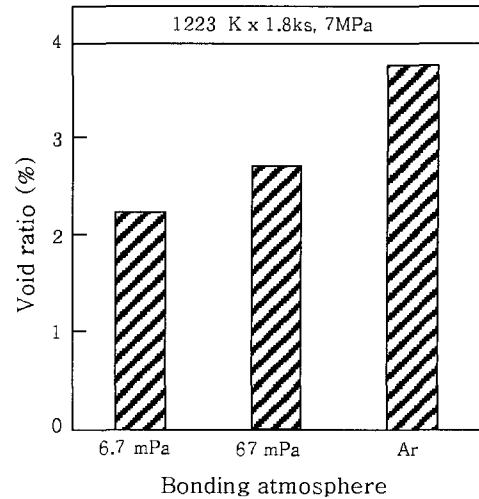


Fig. 4 Effect of bonding atmospheres on void ratio

Fig. 4는 보이드율에 미치는 접합 분위기의 영향을 검토한 결과를 나타낸 것이다. 접합 분위기의 영향은 접합압력을 7MPa로 일정하게 하고 1223K×1.8ks의 조건으로 접합하여 비교하였다. 진공분위기에서 진공도의 영향은 거의 없지만, Ar분위기에서는 진공분위기와 비교하여 보이드율이 높은 것을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 접합온도가 높을수록 보이드율은 감소하고, 접합시간의 영향은 거의 없으며, 적정 접합 압력보다 높을 경우, 흑연의 분말화로 인해 미접합율이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Ar분위기는 진공분위기보다 미접합율이 높았다.

3.2 접합조건에 따른 미세 조직의 변화

접합조건에 따른 미세조직의 변화를 검토하기 위하여, 6.7mPa의 진공분위기에서 접합압력을 7MPa로 일정하게 하고, 각 접합온도에서 1.8ks동안 유지하여 접합한 시험편을 대상으로 검토하였다.

Fig. 5는 FCD 60 원소재의 미세조직을 나타낸 것으로 (a)는 광학현미경조직이고, (b) 흑연 근방, (c)는 기지조직을 나타낸 것이다. 기지는 완전 퍼얼라이트이고, 구상흑연 주위에 페라이트가 존재하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 접합온도에 따른 접합계면근방 FCD 60측

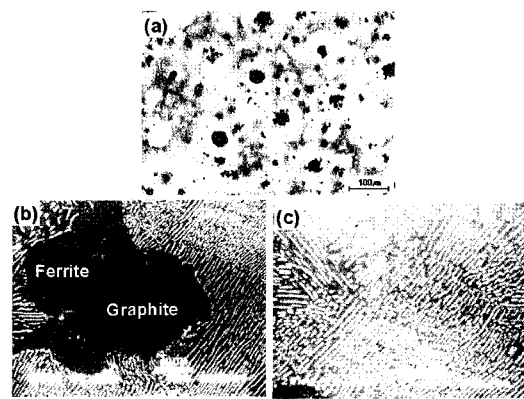


Fig. 5 Microstructures of raw material, FCD 60 (a) Optical microstructure, (b) near graphite (c) matrix

의 광학현미경조직을 나타낸 것이고, Fig. 7은 접합계면의 SEM조직을 나타낸 것이다. 온도가 낮은 1023K의 경우(Fig. 6과 Fig. 7의 (a)), FCD60 측 계면의 미세조직은 페라이트만으로 이루어져 있으나, FCD 60 내부에는 원소재 조직과 비교하면, 기지의 퍼얼라이트가 페라이트(백색)로 변태하였음을 알 수 있다. 1123K의 경우, 광학현미경 상(Fig. 6(b))으로 페라이트가 명확히 구분되지 않지만, Fig. 7(b)에서 볼 수 있는 것처럼 페라이트가 석출되어 있고, 온도가 더 높은

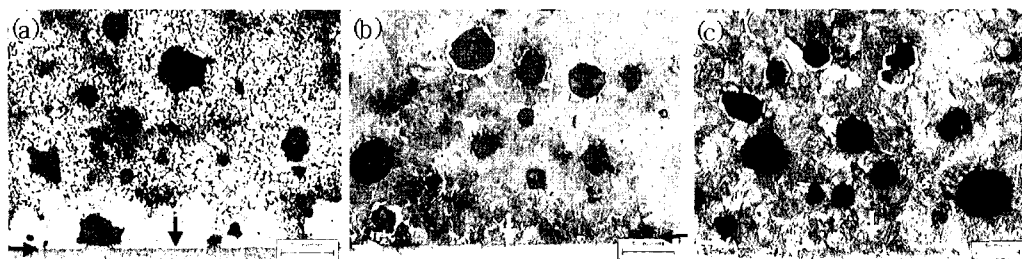


Fig. 6 Microstructures of FCD60 near the bonded interlayer. (a) 1023K, (b) 1123K, (c) 1223K

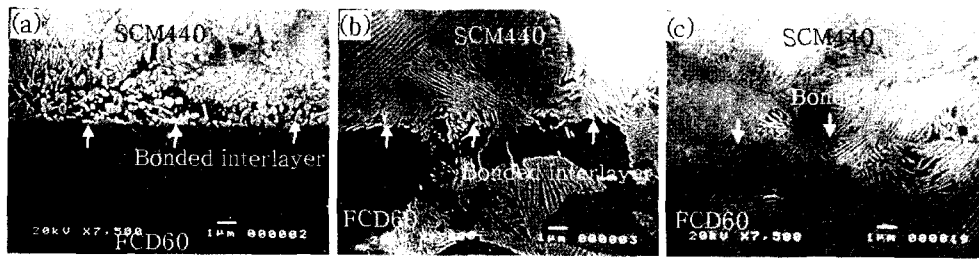


Fig. 7 SEM structures at bonding interface. (a) 1023K, (b) 1123K, (c) 1223K

1273K(Fig.6과 Fig. 7의 (c))의 경우는 거의 퍼얼라이트로 되어 있음을 알 수 있다. 즉 접합온도가 높을수록, 접합계면의 조직은 페라이트 양이 감소하고, 퍼얼라이트 양이 증가하는 경향을 나타내고 있고, 1123K 이상의 온도에서는 FCD60 내부 조직에 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

접합계면 근방의 FCD60 조직과 내부의 조직이 온도에 따라서 차이가 나는 원인을 고찰하면 다음과 같다. Fig. 8은 Fe-2.4%Si-C 3원계 상태도¹⁰⁾를 나타낸 것이다. 사용한 FCD60 주철의 Si함유량이 2.37%이므로 이 상태도를 이용하여 상변태 과정을 해석하여도 타당할 것으로 판단된다. 모재의 탄소 함유량이 3.68% 조성(점선)에서 접합온도 1023K에서 주철은 $\alpha + \nu + Fe_3C$ 의 3상 공존 영역에 있으므로, 접합과정 중에 페라이트가 석출하고, 냉각 시 ν 는 퍼얼라이트 변태하므로, Fig. 6의 (a)와 같이 페라이트가 석출한다. 그러나 접합온도에서 유지하는 동안 접합계면에서는 탄소함유량이 많은 FCD60측에서 함유량이 적은 SCM440측으로 탄소가 확산되어, 계면 근방의 FCD60은 탈탄 현상이 발생하여, 탄소 농도가 아주 낮기 때문에 페라이트화가 더욱 촉진되는 것으로 생각된다. 한편 접합온도 1123K는 $\nu + Fe_3C$ 2상 공존구역에 놓여 있으므로, FCD60 내부의 변화는 거의 나타나지 않는다. 한편 접합계면의 FCD60의 탈탄은 온도가 높을수록 많이 일어

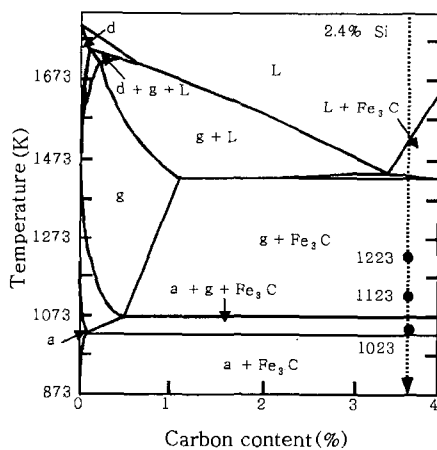


Fig. 8 Phase diagram of cast iron(Fe-C-2.4%Si)

나므로, 탄소의 농도가 더욱 감소하지만, ν 의 탄소고용도가 증가함으로써 흑연이 분해하는 현상이 발생하고, 이와 더불어 SCM강에서 유입되는 Cr, Mo 등과 같은 탄화물 형성 원소의 양이 증가하기 때문에 공석변태 조성이 저탄소 쪽으로 변화하게 된다. 따라서 온도가 높을수록 퍼얼라이트 생성량이 증가하는 것으로 생각된다.

3.3 인장성질

Fig. 9는 6.7mPa의 진공분위기에서 접합압력을 7Mpa로 일정하게 하고, 접합온도와 유지시간을 변화시킨 경우, 접합부의 인장강도와 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 파선으로 표시된 부분은 원소재의 인장강도와 연신율을 나타낸다. 접합온도가 증가할수록 인장강도가 증가하고, 접합온도 1123K 이상에서 접합한 시험편은 인장강도가 FCD60 원소재의 강도보다 높고, 1273K의 것은 SCM440강 원소재의 강도와 거의 같다. 연신율은 접합온도가 증가할수록 증가하지만, 모두 원소재보다 낮음을 알 수 있다. 한편 각 접합온도에서 1.8ks(●)와 3.6ks(○) 동안 유지한 접합 시험편의

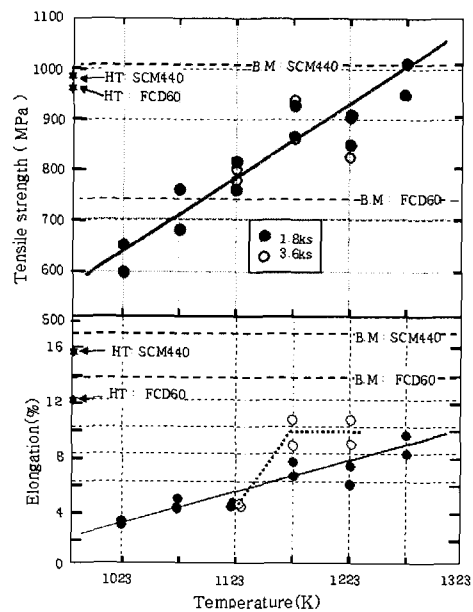


Fig. 9 Effect of bonding temperature and holding time on tensile properties

인장성질을 비교하여 보면, 유지시간에 따른 인장강도의 차이는 거의 없으나, 유지시간이 긴 접합 시험편의 연신율이 다소 증가하는 경향이 있다.

여기서 접합시험편은 보이드가 존재함에도 불구하고, 접합시험편의 인장강도가 원소재 FCD60보다 높게 나타난 이유를 파악하기 위하여, 원소재를 각각 접합조건과 동일한 1223K×1.8ks의 조건으로 열처리한 후, 인장성질을 조사하여 보았다. 이 열처리한 시험편의 인장성질을 ★로 표시하였다. 접합 시험편과 인장성질을 비교하여 보면, 접합 시험편의 강도가 낮음을 알 수 있다. 이것으로부터, 주철 자체가 접합 열이력에 의해서 퍼얼라이트 량이 증가하여 고강도화하기 때문에, 접합부의 강도도 원소재보다 높은 것으로 생각된다. 그러나 접합 시험편은 미접합부가 존재하기 때문에, 열처리된 FCD의 인장강도보다 낮은 것으로 생각된다.

Fig. 10은 1223K×1.8ks 조건으로 접합 분위기 및 접합 압력을 변화시켜 접합한 시험편의 인장강도와 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 접합 분위기에 따른 인장강도의 차이는 거의 없지만, 연신율의 차이는 확연하게 차이가 난다. 즉 진공도가 낮은 것이 연신율이 낮고, Ar분위기의 것이 가장 낮다. 11MPa로 접합한 시험편은 7MPa의 것보다 다소 인장강도가 낮고, 연신율이 아주 낮게 나타난다.

이와 같은 접합조건에 따라 인장성질이 차이가 나는 이유를 관찰하기 위하여 우선 파면을 관찰하여 보았다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 1023K와 1273K에서 1.8ks 동안 유지하여 접합한 인장시험편 중에서 SCM440강 쪽의 파단면을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 1023K의 Fig. 11 (a)로부터, 접합계면에서 파괴된 영역(A)과 주철 모재에서 파괴된 영역(B)으로 나누어짐을 알 수 있다. 접합계면에서 파괴된 영역 A를 확대한 (b)에서, 직선상의 스크래치와 검은색의 미접합부가 보인다. (d)는 흑색으로 보이는 부분(C)을 확대

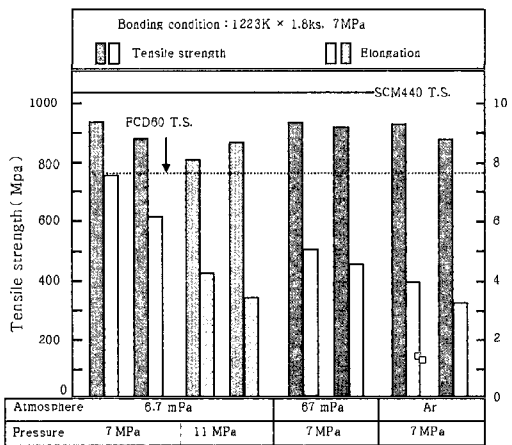


Fig. 10 Effect of the atmosphere and bonding pressure on tensile properties

한 것으로, 이곳은 흑연이 존재하였던 자리로 추측된다. (e)는 (b)의 D부분을 확대한 것으로, FCD60이 붙어 있는 부분과 스크래치가 혼재되어 있는 것을 볼 수 있다. 한편 1273K(Fig. 12)의 경우도 동일하게 접합계면에서 파괴된 영역(A)과 주철 모재에서 파괴된 영역(B)으로 나누어짐을 알 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12를 비교하여 보면, 1273K의 파면이 모재 파면율이 높고, 미접합부로 여겨지는 흑색 부분과 직선상의 스크래치도 확실히 적게 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과는 인장강도 및 연신율의 감소는 보이드율과 밀접한 관계가 있음을 시사한다.

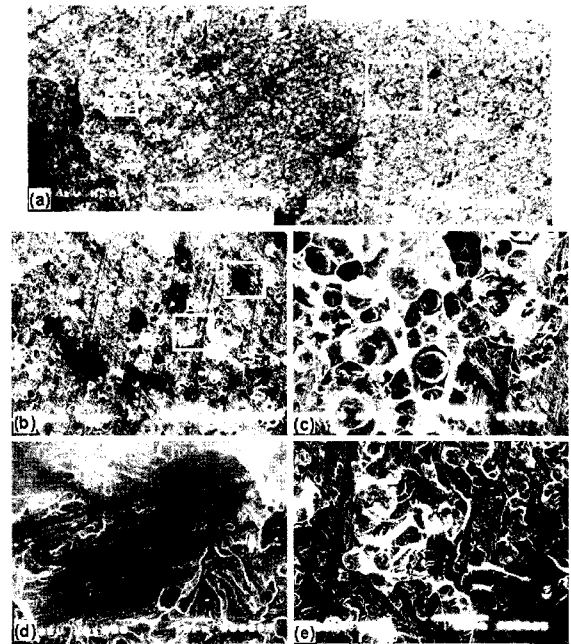


Fig. 11 Fractured surfaces of SCM440 side in tensile specimen.(1023Kx1.8ks, 7MPa). (a) macro-fractography, (b) and (c) A and B retoted in (a), (d) and (e) C and D retoted in (b)

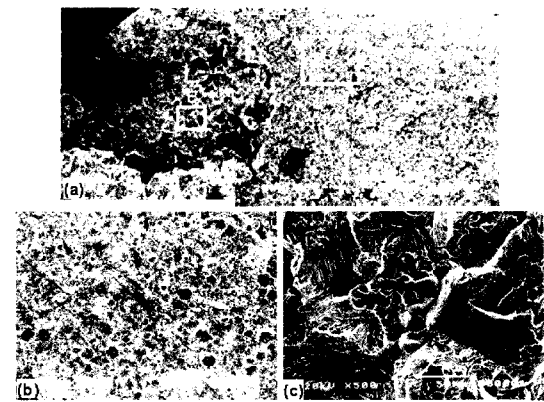


Fig. 12 Fractured surfaces of SCM440 side in tensile specimen.(1273Kx1.8ks, 7MPa). (a) macro -fractography, (b) and (c) A and B retoted in (a)

그래서 인장성질에 미치는 보이드의 영향을 정량적으로 검토하여 보았다. Fig. 13은 접합 분위기 혹은 접합압력만을 변화시킨 Fig. 9의 연신을 결과와 보이드율(Fig. 3)과의 상관관계를 정리한 것이다. 여기서 동일 접합온도와 유지시간으로 접합하였기 때문에 미세조직의 영향은 거의 없을 예상되므로, 이 결과로부터 연신율이 저하하는 근본적인 이유는 보이드율과 밀접한 관계가 있다는 것을 확인할 수 있다.

이상의 분석 결과로부터, 확산접합부의 인장성질은 접합계면 근방 주철의 미세조직과 보이드율에 좌우되는 것을 알 수 있다. 접합온도가 높을수록 보이드율이 감소하고, 양 모재 사이에 확산현상에 의해 접합부 계면 조직이 퍼얼라이트화 함으로써 강도가 증가하는 것으로 생각된다. 또한 접합압력이 너무 높으면, 흑연의 분말화에 의해 미접합부가 생기고, 진공도가 낮거나, Ar을 사용하는 경우는 산화에 의해 보이드율이 증가함에 따라서 인장성질이 저하하는 것으로 생각된다. 특히 인장강도는 미세조직의 영향이 크며, 연신율은 보이드의 영향이 크다.

4. 결 론

구상흑연주철인 FCD60과 SCM440강의 확산접합 기술을 확립하는 것을 목적으로, 접합 온도와 유지시간, 접합 분위기, 압력에 따른 접합현상 및 인장성질에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 보이드율은 접합온도가 증가할수록 감소하였고, 접합시간의 영향은 거의 없었다. 접합압력이 증가하면 접합계면의 흑연의 분말화로 인하여 다소 증가하였다. 진공도에 따른 보이드율의 차이는 거의 없지만, Ar가스 분위기에서는 아주 높게 나타났다.

2) 상태도 $\alpha + \nu + \text{Fe}_3\text{C}$ 의 3상 공존영역 온도인 1023K의 경우, FCD60 내부는 페라이트가 석출하지만, 접합계면에서는 탈탄현상으로 완전 페라이트 조직이었다.

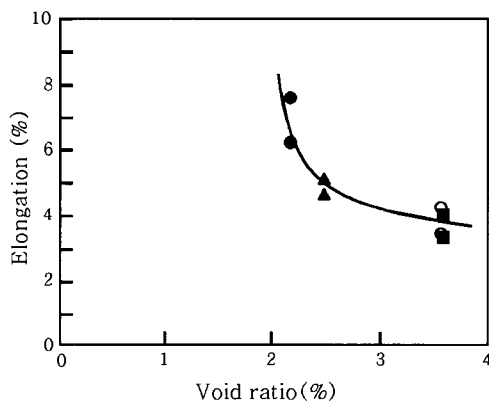


Fig. 13 Effect of the void ratio on the elongation

반면에 $\nu + \text{Fe}_3\text{C}$ 의 2상 공존영역인 1123K~1273K의 경우, FCD60 내부 조직은 원소재와 거의 동일하였지만, 접합계면의 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되고, 온도가 증가할수록 퍼얼라이트 양이 증가하였다. 이것은 탈탄 현상이 발생함에도 불구하고, SCM강에서 유입되는 Cr, Mo 등과 같은 탄화물 형성 원소의 양이 증가함으로써 공석변태 조성이 저탄소 쪽으로 변화하여, 온도가 높을수록 퍼얼라이트 생성량이 증가하는 것으로 생각되었다.

3) 모든 인장시험편은 접합계면에서 파단되었고, 인장강도 및 연신율은 접합온도가 증가함에 따라서 증가하였다. 특히 1123K 이상에서 접합한 시험편은 FCD60 모재의 강도보다 높았고, 1273K에서 접합한 것은 SCM440강 모재의 강도와 거의 같은 인장강도를 얻을 수 있었지만, 연신율은 모재보다 낮았다. 유지시간에 따른 인장성질의 변화는 거의 없었다. 저진공과 Ar분위기에서는 고진공(6.7mPa)과 비교하여, 인장강도의 차이가 거의 없으나, 연신율이 아주 낮았다.

4) 접합온도가 높을수록, 인장강도 및 연신율이 증가하는 것은 보이드율의 감소와 접합계면 조직의 퍼얼라이트 양이 증가하는 2가지 요인에 의해 생긴다. 같은 접합온도라도 접합분위기가 불량하면, 보이드율이 높아 연신율이 저하하는 것으로 생각되었다. 결국 보이드는 강도보다 연신율에 더 큰 영향을 미친다.

후 기

본 연구는 현대중공업(주) 산학협동 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

참 고 문 헌

- O. Ohashi : J. of the Japan Welding Society, 62-7(1993), p512
- I. Sakurai, and H. Maedono : Casting Engineering, 68-1(1996), p 43
- F.A Calvo : J. of Materials Letters, 24(1989), p4152
- S. Makae and K Nishio : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 4-1(1986), p66
- S. Makae and K Nishio : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 6-1(1986), p22
- S. Makae and K Nishio : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 6-3(1986), p375
- S. Makae and K Nishio : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 8-1(1990), p14
- S. Makae and K Nishio : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 8-1(1990), p97
- S. Makae and K Nishio : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 17-2(1999), p310
- ASM International : ASM Specialty Handbook, Cast Iron, 1996, p8