

Ni-Zn Ferrite/Epoxy 복합재료의 기계적 성질에 관한 연구

문 경 식 · 이 경 호* · 최 형 도 · 문 탁 진† · 한 기 철

고려대학교 재료공학과, *순천향대학교 재료공학과
(1995년 1월 6일 접수)

Study on the Mechanical Properties of Ni-Zn Ferrite/Epoxy Composite

Kyoung-Sik Moon, Kyoung-Ho Lee*, Hyung-Do Choi, Tak-Jin Moon†, and Ki-Chul Han

Dept. of Materials Science and Engineering, Korea University

*Dept. of Materials Engineering, Soonchunhyang University

(Received January 16, 1995)

요 약 : 본 연구에서는 니켈-아연 페라이트와 에폭시 복합재료의 기계적 성질에 대하여 고찰 하였다. 인장 시험, 굽힘 시험, 경도 시험 등을 하여 복합재료의 파괴강도, 인성, 영율 등을 측정하였다. 또한 페라이트 함량, 페라이트 입자 크기, 그리고 계면 결합제의 함량을 실험 변수로 정하여 실험을 행하였다. 실험 결과, 복합재료의 인성은 페라이트 함량이 50 vol%까지 증가함에 따라 페라이트가 첨가 되지 않은 순수한 에폭시의 값보다 3배 정도 증가하였다. 주 인성화 기구는 크랙 pinning, 크랙 deflection 등의 복합적인 것이다. 경도와 영율도 페라이트 함량이 증가함에 따라 증가함을 보였다. 반면, 파괴 강도는 페라이트 함량이 증가함에 따라 약간 감소 하였다. 그것은 충전제와 수지사이의 열팽창 계수가 다르고 탄성계수 또한 불일치하기 때문인 것으로 생각한다. 페라이트 입자 크기가 증가함에 따라 파괴 강도는 감소 하였다. 계면 결합제를 1 wt% 처리한 것까지는 복합재료의 전체적인 기계적 성질이 증가하였지만 그 이상의 계면 결합제 첨가에서는 기계적 성질에 큰 변화가 없었다.

Abstract : The mechanical properties of Ni-Zn ferrite-particulate epoxy composites were studied. The fracture strength, toughness and Young's modulus of the material were measured by the tensile test, 3-point bending test and hardness test in terms of particle size, volume fraction of ferrite, and the weight fraction of coupling agent. Test results indicated that the fracture toughness, increased about 3-fold with increasing ferrite volume. The main toughening mechanism was the combination of crack pinning and crack deflection. Hardness and Young's modulus also increased with increasing ferrite volume content. On the other hand, fracture strength decreased slightly with increasing ferrite content due to the mismatch in coefficient of thermal expansion and elastic modulus between the matrix and the filler. The fracture strength test also indicated that the strength decreased with increasing ferrite particle size. The coupling agent treatment up to one weight percent improved the overall mechanical properties, however, the effect was saturated above this value.

Keywords : Ni-Zn ferrite-epoxy composite, fracture strength, fracture toughness, elastic modulus.

서론

전자, 통신기기의 대량보급에 의해 발생하는 EMI (Electro Magnetic Interference) 문제가 고품질의 전파환경 조성에 장애물이 되고 있다. 이러한 EMI로 인한 문제들을 최소화시키기 위한 노력의 하나로서 제시되는 것이 전파흡수체이다.

소결체 페라이트만으로 구성된 전파흡수체는 VHF와 UHF에서 우수한 전파흡수 특성을 나타내지만 전파흡수능을 발휘하는 대역폭이 좁다.¹ 따라서 소결체 페라이트의 화학조성, 결정입자크기, 기공율 등을 조절하여 전파흡수체의 특성을 개선하고 있다.² 그러나 이러한 개선만으로는 전파흡수 주파수 대역을 광대역화시키기에는 한계가 있어, 페라이트 분말을 수지등의 절연물에 분산시킨 페라이트 복합재료가 마이크로파 영역에서의 전자파 흡수재료로서 활용이 기대되고 있다.

기존의 전파흡수체에 대한 연구의 관심은 주로 재료가 갖는 복소투자율, 유전율 특성 등의 전자기적 성질에 주로 집중 되어 왔으며 전파흡수체의 기계적 성질등에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 고분자 복합재료가 전파흡수체로 사용될 경우, 내장재료나 구조재료 등으로의 응용성이 높기 때문에 이들의 기계적 성질에 관한 정보를 얻는 것은 전파흡수체를 복합재료로 구현할 경우 상당히 중요한 문제로 대두 될 것이다.

본 연구에서는 페라이트의 고주파 자화기구를 고려할 때 페라이트 복합재료에 사용되는 페라이트 분말의 입경이 중요하기 때문에 입자의 크기를 변화시켜 이들에 대한 영향을 고찰하였으며, 매트릭스와 충전제간의 접착에 미치는 영향을 살펴보기 위해 페라이트 표면처리를 변화시켰다. 또한 충전제인 페라이트의 함량이 전파흡수 특성에 미치는 영향이 크므로 페라이트의 함량에 따른 기계적인 특성을 고찰하였다. 그러므로 페라이트의 함량, 표면처리제의 함량 및 입자크기를 실험 변수로 설정하고 인장 시험, 굽힘 시험, 경도 시험 등을 통해 페라이트/에폭시 복합재료의 기계적 성질을 측정하였다.

실험

에폭시-페라이트 복합재료로서, 고분자 지지재료인 에폭시는 일본 스미토모 화학에서 제조된 cresol novolac epoxy resin ESCN 195-6을 사용하였다. Fe_2O_3 , NiO, ZnO (Aldrich, 99%)를 Table 1과 같이 평량하여 박스형 로에서 분당 5℃씩 승온하고 1200℃에서 2시간 유지시켜 열처리한 후 재분쇄하여 페라이트 분말을 만들었다.

이렇게 만들어진 페라이트 분말을 200, 230, 270, 325 mesh를 차례로 통과시켜 62~74, 53~62, 44~53 μm 사이와 45 μm 이하의 입자크기를 갖는 페라이트 분말을 각각 준비하였다.

에폭시와의 결합력 및 충전제의 분산효과에 따른 재료의 특성을 보기 위하여 Union Carbide사의 실란계 커플링제 A-187 (γ -glycinoxypopyl-trimethoxy silane)을 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 wt% 첨가하여 페라이트 표면을 처리하였다. 표면처리된 페라이트를 각각의 입자크기별로 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60 vol%로 에폭시에 첨가하였고, 이때 에폭시는 경화제로 일본 아카리와의사의 phenol novolac resin인 tamanol 758을 ESCN 195-6에 대해 1:1 당량비로 첨가하여 혼합하였다. 복합재료의 혼합은 mill-mixed 혼합방법을 이용하였다. 그리고 시편은 압축 성형하였으며 성형한 시편은 180℃에서 5시간 동안 경화시켰다.

인장 실험을 위한 시편은 ASTM D 638M에 기술된 Type M-3의 Dumbell형으로 압축성형하였다. 시편의 너비와 두께를 0.1 mm까지 측정된 후 10 mm의 기준선을 잡았다. 실험기기로는 Universal Testing Machine (Instron, Model 4502, 500 Kg capacity)을 사용하였고 cross head speed는 1 mm/min으로 하였다. 측정치는 10개씩의 시편에

Table 1. Experimental Composition

Raw Material	Fe_2O_3	ZnO	NiO
wt%	66.8	23.83	9.37

대해 평균값으로 하였으며, 실험시 실내온도가 일정하도록 주의하였다.

Bending test를 위한 시편은 60×60 mm의 크기로 압축 성형하여 diamond cutter를 이용하여 40×4 mm로 절단하였다. 응력 강도 인자를 결정하기 위해 precrack은 절단된 시편의 폭 부분에 diamond cutter로 blunt notch를 내어 만들었다. Bending test는 Shimadzu (AGA-1000D)를 사용하였으며 cross head speed는 0.5 mm/min로 하였다. Precrack의 길이는 파괴 실험 후 광학현미경으로 측정하였다.

Notch를 낸 것과 notch를 내지 않은 시편을 three point bending test로 파괴시 하중을 구하고 precrack의 길이를 측정하여 다음 (1)식으로 임계 응력 강도 인자(K_{IC})를 구하였다.¹²

여기서,

$$K_{IC} = \frac{P_s}{bw^{3/2}} \left[2.9 \left(\frac{a}{w} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a}{w} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a}{w} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{a}{w} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{a}{w} \right)^{9/2} \right] \quad (1)$$

P =하중, s =Span between support, w =시편 폭, b =시편 두께이다.

Wilson Rockwell (L-scale) Hardness test를 이용하여 경도실험을 하였다. 이때 사용한 steel ball indenter의 직경은 1/4 inch이며 minor load는 10 kg이고 major load는 60 kg이었다.

Scanning Electron Microscope (SEM; Jeol, JXA-8600 그리고 Hitachi)을 이용하여 페라이트 분말과 복합재료내에 존재하는 페라이트의 분산상태와 파단면을 관찰하였다. 이때 10~20 kV로 작동하였으며, 각각의 시편은 금으로 약 20 nm두께로 코팅하였다.

원판형(직경:10mm)시편과 10×10×3 mm의 시편의 표면을 diamond grinding wheel로 잘 연마한 후 증류수에서 2시간 이상 끓여 시편에 존재하는 개기공을 물로 포화시켰다. 부유무게(W_{ss})와 포화무게(W_s)를 4회 측정하고 100℃ 오븐에서

24시간 건조시킨 후 건조무게(W_d)를 측정한 후, 알키메드법에 의하여 겉보기밀도(ρ_b)와 기공율(%P)을 결정하였다.

결과 및 고찰

경 도. Fig. 1은 페라이트 함량에 따른 경도를 나타내었다. 페라이트 함량이 증가함에 따라 경도가 증가하였다. 페라이트는 매트릭스인 에폭시보다

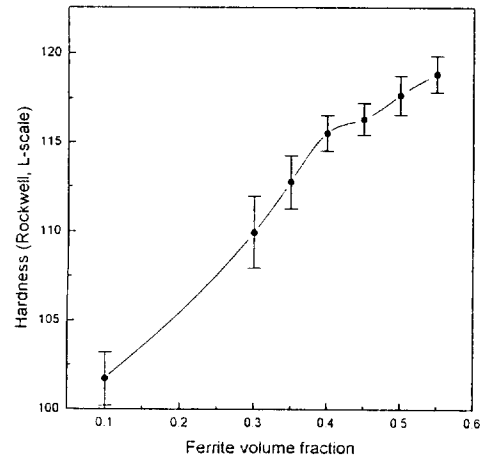


Fig. 1. The variation in hardness with volume fraction of ferrite.

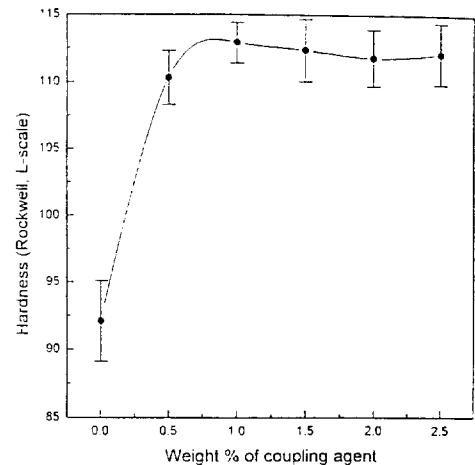


Fig. 2. The variation in hardness with weight fraction of coupling agent.

훨씬 더 단단하다. 그러므로 매트릭스보다 단단한 입자가 첨가되므로 페라이트 함량이 증가함에 따라 경도가 증가되는 것으로 생각된다.

Fig. 2는 페라이트 입자의 표면 처리 정도에 따른 경도를 나타낸 것이며 페라이트의 함량은 50 vol%이다. 표면처리를 하지 않은 것에서 1 wt% 까지 페라이트의 표면을 처리할 때까지 경도가 증가하다가 그 이상에서의 값에서는 거의 변화가 없었다. 따라서 충전제를 1 wt%의 실란제 결합제로 표면처리할 경우 충전제의 표면은 충분히 결합제로 둘러 쌓이는 것으로 간주되어 그 이상의 함량 변화는 페라이트와 에폭시의 결합력에 큰 영향을 주지 못한다고 생각된다. 이 결과는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 결합제 함량에 따른 파괴강도와 비슷한 경향을 보였다.

영율(Young's Modulus). Fig. 3은 복합재료의 영율에 대한 충전제 함량의 영향을 나타낸 것이다. 충전제의 함량이 증가함에 따라 영율은 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 거동을 설명하기 위해 여러 문헌이 발표되었으며 복합재료의 영율에 대한 충전제 함량 의존성을 설명하기 위해 여러 이론들이 제시되었다. Ishai와 Cohen³은 복합재료의 매트릭스의 겹질에 의해 정육면체의 입자가 둘러 쌓였을 때 복합재료의 영율을 식(4), (5)와 같이 그리고 Paul⁴은 식(2), (3)과 같이 모델화 했다.

$$E_c = E_p E_m / [(1 - V_p) E_p + V_p E_m] : \text{lower boundary} (2)$$

V_p 는 충전제의 부피비, E_c , E_m , E_p 는 각각 복합체, 수지, 충전제의 영율이다.

$$E_c = (1 - V_p) E_m + V_p E_p : \text{upper boundary} (3)$$

Upper boundary는 정육면체의 경계가 균일한 변형이동거리하에 있을때

$$E = E_0 \left(1 + \frac{V_p}{[m/(m-1) - V_p^{1/3}]} \right), m = E_p/E_m (4)$$

Lower boundary는 정육면체의 경계가 균일한 응력하에 있을때

$$E = E_0 \left(1 + \frac{1 + (m-1)V_p^{2/3}}{1 + [(m-1) - (V_p^{2/3} - V_p)]} \right) (5)$$

충전제 함량과 수지, 충전제의 영율 비를 알면 복합재료의 영율을 예상할 수 있다. Fig. 3에서 선들로 표시된 것이 위 식들에 의한 상한선과 하한선의 경계들이다. 비교적 이론치에 잘 맞는 것으로 판단된다. 하지만 Paul의 계산식의 범위에는 실험치가 거의 다 포함되며 Ishai와 Cohen의 계산식에 의해서는 실험치가 하한선의 경계에 있거나 그 보다는 약간 작은 값을 보이고 있다. 이것은 무질서한 각형 모양의 페라이트 입자가 모델에서 설정한 정육면체와 길이 및 부피에서 차가 생길 수 있기 때문에 계산치와 실험치 사이에 차이가 나타날 수 있으며, 특히 페라이트 함량 증가에 따른 inherent flaw size의 증가로 인해 재료내부의 결함이 영율을 이론값보다 감소시켰다고 생각한다. 또한 두 요소(충전제, 매트릭스)간의 탄성 성질의 차이로 인한 응력 집중도 그 원인으로 생각할 수 있다.

Fig. 4는 페라이트 표면 처리에 따른 영율의 변

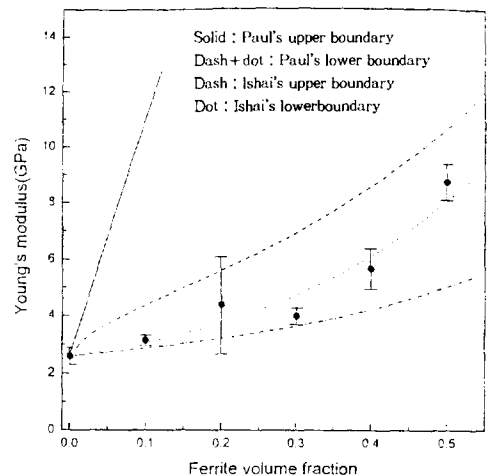


Fig. 3. The variation in Young's modulus with ferrite volume fraction.

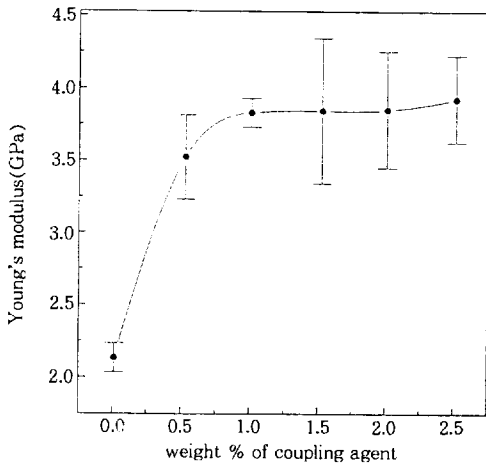


Fig. 4. The variation in fracture strength with weight percent of coupling agent.

화를 나타내었다. 표면처리를 하지 않은 것에서 0.5~1 wt% 까지 페라이트의 표면을 처리한 것에서는 영율이 급격히 증가하고 그 이상의 결합제를 첨가하면 그다지 큰 변화는 없었다. 이 결과는 결합제 함량에 따른 정도값과 흡사한 경향을 보였다.

파괴강도(Fracture Strength). Fig. 5는 페라이트 함량에 따른 파괴강도를 나타낸 것이다. 이때 결합제는 2.5 wt% 첨가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 페라이트 함량이 증가함에 따라 파괴강도가 충전제가 첨가되지 않은 것에 비해서 점점 감소하는 경향을 보였다.

페라이트가 첨가된 에폭시 복합재료의 파괴강도 값이 충전제를 첨가하지 않은 순수한 에폭시의 파괴강도 값보다 작게 나온 결과는 보통 brittle-brittle composite에서 흔히 보이는 현상 중의 하나이다.

그러나 1966년 Hasselman⁵은 brittle 충전제가 분산된 brittle material의 강도는 충전제가 첨가됨에 따라 증가함을 보였다. Hasselman의 이론은 입자-입자 사이의 매트릭스에서 균열이 발생하며 그 균열크기는 입자간의 거리로 제한되기 때문에 충전제의 함량이 증가할 때 균열 크기가 감소하여 강도는 증가한다고 했다. 이와 같은 논리는 본 실험과 상반된 결과를 나타낸다. 그러나 Sahu등⁶은 충전제의 함량이 증가함에 따라 inherent flaw size가

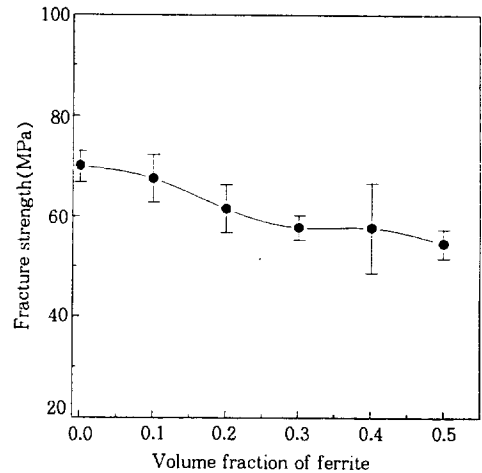


Fig. 5. The variation in fracture strength with volume fraction of ferrite.

증가하여 강도가 감소함을 이론적으로 고찰하였다. 충전제의 첨가에 따라 강도가 감소하는 것은 다음의 두가지 요인에 의한 것이라고 생각된다.

첫째 요인은 복합재료 제조시 충전제와 매트릭스의 열팽창 계수 차이와 탄성율의 불일치에 의해 이들의 계면에서 발전된 인장응력이 발생하여, 이로 인하여 inherent flaw의 형성과 이들의 크기가 증가할 가능성이 커지게 되므로 복합재료의 강도가 감소한 것으로 생각했다. 그러나 복합재료의 파괴강도에 대한 열팽창 계수의 영향은 크게 두가지 상반된 논리가 있다.

첫째, brittle 매트릭스에 그 매트릭스의 열팽창 계수보다 큰 값을 갖는 입자가 첨가되면 그 열팽창 계수 차이에 의해 발전된 tangential 방향의 압축 응력이 매트릭스에 생기게 되어 강도가 증가한다는 이론이며 대표적인 연구자로는 Tummala⁷가 있다.

둘째, brittle 매트릭스에 다른 열팽창 계수 값을 갖는 brittle한 입자가 첨가될 때는 복합재료의 강도가 입자가 첨가되지 않을 때 매트릭스의 강도값보다 항상 감소된다고 주장한 이론으로 그 대표적인 연구자는 Binns⁸이다. 본 실험의 결과는 후자의 이론과 일치함을 알 수 있다. 즉 두 상의 열팽창 계수 차이와 탄성율의 불일치가 있으면 이들 사이의 계면에서 국부적인 응력이 발생하여 균열 형성

가능성이 증가하고 충전제의 함량이 증가함에 따라 이 가능성은 더욱 증가하기 때문에 파괴강도가 떨어진다고 생각한다.

복합재료 제조시 충전제와 매트릭스의 열팽창 계수의 차이에 의해 그 계면에는 radial 방향으로 압축응력이 생기고, tangential 방향으로는 잔류 인장응력이 생길 수 있다. 이와 같이 페라이트를 첨가한 에폭시의 제조시 생길 수 있는 잔류 열응력은 페라이트 함량이 증가함에 따라 시편 전체에 걸쳐 발전될 수 있어 시편에 균열 생성의 확률을 높이기 때문에 파괴강도가 감소 하는 것으로 생각 된다.

두번째 요인은 공정상 형성되는 충전제의 응집에 따른 기공 형성과 이들 기공이 stress concentration으로 작용하여 복합재료의 강도를 저하시킨다고 생각했다.

Lange⁹는 분산 입자가 응집될 경우나 큰 체적 분율의 복합재료의 경우 크랙이 훨씬 더 쉽게 생길 수 있다고 지적했다. 기공율을 측정한 결과, 페라이트 함량이 증가함에 따라 기공율은 증가하였다. 페라이트-에폭시 복합재료에서 기공이 형성되면 이들 기공이 응력 집중 인자로 작용하게 되며, 충전제와 매트릭스 사이의 결합력을 저하시키므로 파괴강도에 영향을 주는 것으로 생각된다. 그러므로 이상의 결과로 미루어 충전제의 함량이 증가함에 따라 위 두가지 요인에 의해 파괴강도가 감소된 것이라 생각했다.

Davidge와 Green¹⁰은 이러한 응력때문에 외부 응력이 가해지기 전에도 입자들 주위에 탄성 변형 에너지가 축적 된다는 이론을 제시했다. 축적되는 탄성 변형 에너지는 물질의 체적에 비례한다. 또한 이러한 탄성 변형 에너지는 입자의 크기에 비례하는 것으로 알려져 있다. 그래서 임계입자 크기를 초과하면 축적된 탄성 변형 에너지가 입자, 계면, 그리고 매트릭스 중에서 가장 약한 곳의 effective surface energy보다 크게되어 크랙이 생겨서 발달될 수 있다.

외부응력이 걸릴 때 복합재료를 구성하는 충전제와 매트릭스의 영율의 불일치는 충전제의 사이에

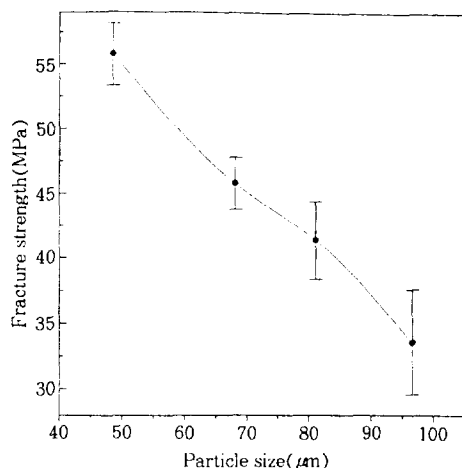


Fig. 6. The variation in fracture strength with particle size of ferrite.

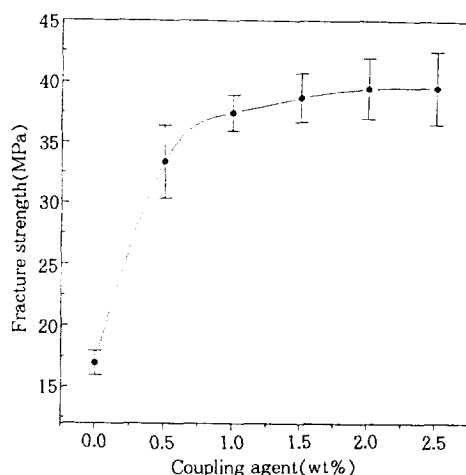


Fig. 7. The variation in fracture strength with weight percent of coupling agent.

응력을 발달시킨다. 이러한 경향은 입자의 크기가 클수록 더 강한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Fig. 6은 입자크기가 파괴강도에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 파괴강도가 입자크기의 증가에 따라 감소함을 보였다.

Fig. 7은 A-187 결합제의 함량이 변함에 따른 파괴강도를 나타내었다. 그림과 같이 결합제가 1 wt%까지는 파괴강도가 증가하지만 그 이상 첨가되면 파괴강도가 완만하게 변하는 것을 볼 수 있다. 결합제의 양과 파괴강도의 관계가 포화를 이루

는 것은 충전제를 표면처리할 수 있는 결합제의 양이 1 wt%일 때 충전제를 완전히 둘러싸는 정도가 적당하다는 것을 암시한다. 일반적으로 결합제가 충전제 주위를 둘러싸서 단층 (monolayer)을 형성하게 되면 그 이후 결합제의 양이 증가하더라도 물성에는 큰 영향을 주지 않는다 것이 알려져 있다.¹¹

인성(Toughness). Fig. 8은 페라이트함량에 따른 K_{IC} 의 값을 나타내었다.

충전제 함량이 증가함에 따라 K_{IC} 값은 증가하였다. 충전제 함량이 증가함에 따라 인성이 이와같이 증가하는 원인은 다음과 같다.

1. 충전제가 크랙이 진행되는 방향을 다른 방향으로 돌리고 결국 파괴의 비표면적을 더 제공하기 때문이다.

2. 수지상이 소성 변형을 많이 한다.

3. 금속류나 고무상의 입자인 경우 충전제가 변형되어 흡수된 에너지가 인성을 증가시킨다.

4. 충전제가 크랙을 pinning하여 크랙의 전단이 충전제 입자들 간에서 휘어지는 현상등이 생긴다.

5. Microcracking이 일어날 가능성이 있다. Microvoid등에 의해 진행되는 크랙의 에너지가 풀려 버리는 경우가 있다.

2번이나 3번의 경우 본 실험과는 차이가 있다. 그것은 충전제인 페라이트나 수지인 에폭시의 경우 brittle한 편이기 때문이다. 비교적 약한 충전제의 경우 그 함량이 증가할 때 어느 임계함량에서 인성이 증가하지 않고 포화될 수 있는데 그것은 충전제의 강도가 약한 편일 때 크랙이 입자들을 파괴시키면서 진행하기 때문에 더 이상의 인성증가가 있을 수 없는 경우이다. 그러나 페라이트를 충전제로 첨가했을 때 복합재료의 인성은 입자와 수지와의 계면에서 응력집중이 생겨 계면이 파괴될 때까지 크랙이 페라이트 충전제에 의해 pinning이 되어 인성을 증가시켰을 것이라고 생각된다. 또한 크랙이 입자를 통하지 못하고 돌아 나가는 과정에서 생기는 선형에너지의 증가도 인성을 증가시키는 원인일 것이다. 그 증거로는 현미경 사진에서 볼 수 있는 step이나

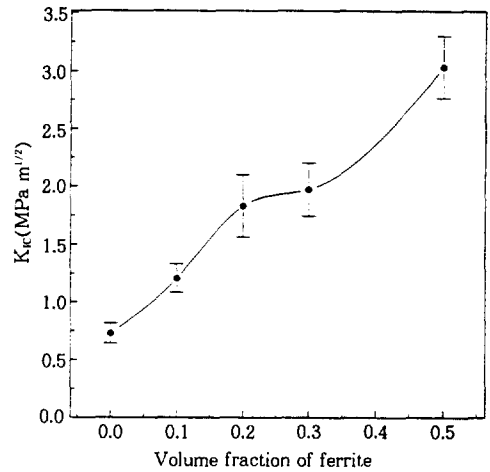


Fig. 8. The variation in stress intensity factor with volume fraction of ferrite.

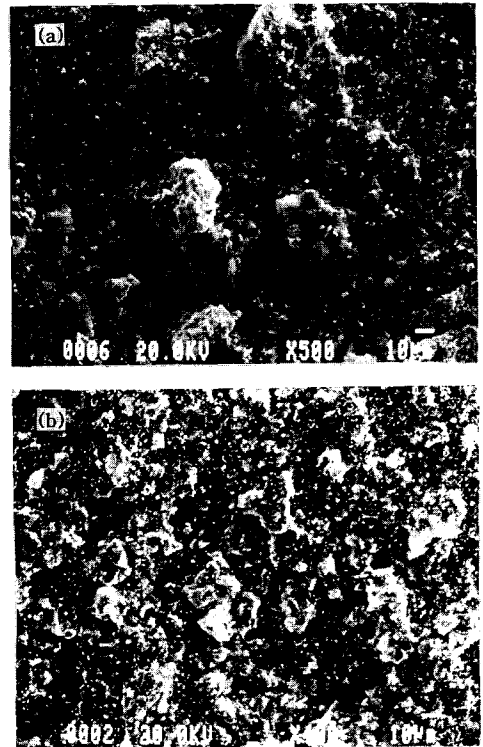


Fig. 9. SEM micrographs of fracture surface for composite a) ferrite 20 vol% and b) ferrite 50 vol%.

이나 welt 등을 들 수 있는데 그것들은 입자주위를 돌아서 진행하게 되는 크랙이 입자 주위로 돌아나

간 후 서로 위치가 맞지 않아서 층이 남는 것이다. 사진을 보면 페라이트를 둘러 싸고 있는 에폭시가 크랙이 지나간 후 뭉개지면서 층이 남는 것을 관찰할 수 있었다.

파괴강도는 감소하나 인성이 증가하는 이유는 재료의 인성은 여러기구들이 복합적인 형태로 작용하기 때문이다.

Fig. 9는 페라이트가 20 vol%, 50 vol% 첨가된 시편의 파괴 단면을 관찰한 사진이다. 입자들 주위로 에폭시가 그대로 묻어 있고 입자주위에 크랙이 돌아서 지나간 흔적을 볼 수 있다. 크랙 전면이 입자와 만나고 입자주위를 감돌아 지나갈 때의 위치와 동일하지 않아 생기는 자리로 생각되는 step들이 관찰 된다. 20 vol% 때 보다 50 vol%의 시편에서 더 많은 step들이 발견 되었으며 이 그림으로 보아 페라이트 함량이 증가함에 따라 크랙이 지나가기 위해 더 많은 선형 에너지가 필요했으며 충전제인 페라이트가 크랙이 진행하는 것을 방해했음을 알 수 있다.

결 론

Ni-Zn페라이트/에폭시 복합재료의 페라이트 함량별, 페라이트 입자크기별, 결합제 함량을 변화시키면서 기계적 특성을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 페라이트/에폭시 복합재료의 경도는 페라이트 함량이 증가함에 따라 증가하였다.
2. 결합제 함량을 변화시켜 페라이트 입자의 표면처리 정도를 달리 했을때 파괴강도, 영율, 및 경도 값이 결합제 함량이 1 wt%까지는 증가하다가 1~1.5 wt%에서는 포화되는것을 알았다.
3. 충전제 입자의 크기가 작을 수록 파괴강도와

영율이 증가함을 알았다.

4. 페라이트 입자의 함량이 증가함에 따라 파괴강도는 감소하였다. 이것은 매트릭스인 에폭시와 첨가된 페라이트 입자의 열팽창계수 및 탄성율이 차이가 나면서 생긴 잔류 열응력과 계면에 생기는 탄성 변형 에너지때문이라고 생각한다.

5. 페라이트 함량이 증가함에 따라 응력강도인자(K_{Ic})는 증가하였다. 이때 인성 기구는 페라이트 입자의 충전에 의한 crack deflection과 crack pinning 등의 복합적인 인자에 의한 것이다.

참 고 문 헌

1. K. Y. Kim, W. S. Kim, and Y. D. Ju, *Kor. Phys. Soc.*, **31**(5), 639 (1991).
2. H. Igarayoshi and K. Okazaki, *J. Am. Ceram. Soc.*, **60**, 1 (1977).
3. O. Ishai and L. J. Cohen, *Int'l. J. Mech. Sci.*, **9**, 539 (1967).
4. B. Paul, *Trans. Am. Inst. Mech. Engrs.*, **36**, 218 (1960).
5. D. P. H. Hasselman and R. M. Fulrath, *J. Am. Ceram. Soc.*, **49** (2), 68-72 (1966).
6. S. Sahu and L. J. Broutman, *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 91~100 (1972).
7. R. R. Tummala and A. L. Friedberg, *J. Am. Ceram. Soc.*, **52** (4), 228-229 (1969).
8. D. B. Binns, in "Science of Ceramics", 1st Ed., Ed. by G. H. Stewart, pp 315-334, Academic Press, London and New York, 1962.
9. F. F. Lange, *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**, 614 (1971).
10. P. K. Mallick and L. J. Broutman, *Mater. Sci. Eng.*, **18**, 63-73 (1975).
11. H. Ishida and J. L. Koenig, *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, **17**, 1809 (1979).
12. J. K. Kim and C. R. Choe, *Polym. Sci. Tech.*, **3**(1), 24~33 (1992).