

핵연료심 피복에 미치는 온도 및 die 영향

이종탁, 조해동, 고영모, 이돈배, 김창규
한국원자력연구소

요 약

하나로 핵연료인 uranium silicide 봉상 핵연료의 cladding은 핵연료 심재인 U_3Si -Al봉과 Al 1060 cladding 재의 접합이 잘 이루어지고, cladding 재인 Al이 완전하게 용접되어 cladding층내에 결함이 없이 cladding 되는 최적의 온도는 $510^{\circ}C$ 이며, 핵연료심의 직경이 감소되거나 변형되지 않고 핵연료심과 cladding 재가 잘 압착되는 nipple과 die 사이 거리는 0.9 - 1.5mm 이다.

1. 서 론

다목적 연구로인 하나로의 핵연료는 저농축 uranium 핵연료를 사용하는 데, 저농축 uranium 핵연료로는 uranium 밀도도 비교적 높고, 연소 안정성이 있는 uranium silicide계 합금의 핵연료를 개발하고 있다[1]. 하나로 운전과 더불어 하나로 핵연료 국산화의 필요성이 요망되고 있으며, 연구로의 핵연료 국산화 기술은 수년전 부터 시작되어 U_3Si , U_3Si_2 , U-Si-Al 합금의 용해주조, 분말압출 및 핵연료심 피복(cladding) 기술을 자체적으로 개발하였고, 특히 uranium silicide 합금인 U_3Si 및 U_3Si_2 atomizing 방법을 고안하여[2] 실질적으로 저농축 uranium 핵연료 개발에 동참하게 되었다.

핵연료의 국산화개발의 핵심 기술인 핵연료심 피복은 정상운전조건에서 핵연료심을 유지하고, 핵연료심의 부식을 방지하며, 핵연료심 swelling에 의한 변형효과를 감소하고 열전달이 좋아야 한다. Al 금속을 cladding 하는 방법은 cladding 재료인 Al 1060을 고온에서 압출하면서 핵연료심을 cladding한다. 따라서 Al billet을 연속적으로 압출하여도 billet 간의 구별없이 연속적으로 피복되도록 billet이 변형되는 구간에서 좋은 용접성을 갖도록 온도조절이 정확하여야 하며, billet 표면에 불순물이나 표면결합등이 없어야 한다[4,5,6]. 피복재에 압축된 공기가 함유되어 피복시 피복재의 손상을 방지하기 위하여 billet 압출시 공기가 함유되지 않도록 하여야 한다. 또한 cladding재료가 Al 1060이므로 피복되면서 핵연료심의 부분적인 표면결합을 채워주기 때문에 연료봉의 표면품질을 완화시켜준다.

Cladding 온도는 cladding 재료의 종류에 따라 다르며, cladding nipple과 die 사이의 거리는 cladding 재료와 심재와의 접착성과 밀접한 관계가 있다. 따라서 본 논문에서는 피복온도와 cladding nipple과 die 사이의 거리 변화에 따라 핵연료심 피복에 미치는 영향을 검토하고자 핵연

료심 표면의 인위적인 결함에 cladding 재료가 채워지는 정도 및 피복강도를 측정 분석하였다.

2. 실험방법

핵연료심 cladding에 사용한 Al billet는 Al 1060 ϕ 38 환봉으로 동양 강철에 주문생산한 제품이며, 압출기는 200톤 수직압출기를 사용하였다. Cladding은 cladding 압출온도 450 - 530 $^{\circ}$ C, 압출기 ram 속도 5.5 mm/sec, cladding 압출비 52의 조건에서 cladding nipple과 die 사이의 거리를 0.5, 0.9, 1.27, 1.6 mm로 변화시키면서 cladding 하였다.

Dummy 심은 ϕ 6.35 인 Al 6061 rod를 Fig. 1 과 같이 홈 깊이 d 를 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6 mm 로 원주 가공하여 사용하였으며, cladding 후 원주가공 부위를 절단하여 길이 방향의 단면을 관찰하였다. Cladding 강도를 측정하기 위한 시편의 심은 ϕ 6.35인 Al 1060 rod를 사용하였으며, cladding 강도 측정용 시편은 cladding 된 시편의 양 끝부분의 cladding 된 부위의 길이를 10 mm로 하여 Fig. 2 와 같이 제작하였다. Cladding 강도 측정은 cross head speed 3mm/min 로 인장시험을 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 cladding nipple과 die 사이의 거리(D)가 0.5, 0.9, 1.27, 1.6mm일 때 530 $^{\circ}$ C에서 cladding 한 시편의 단면사진이다. 거리 D가 0.5mm일 때는 홈깊이 0.6mm, D가 0.9mm 일 때는 홈깊이1.0mm, D가 1.27mm, 1.6mm 일 때는 홈깊이 1.6mm 까지 완전하게 cladding 재료가 채워진다. 이러한 현상은 nipple 과 die 사이의 거리가 길어질수록 cladding재가 심봉을 압착하는 힘이 증가하는 것을 의미한다.

Fig. 4는 cladding nipple과 die 사이의 거리가 0.5 mm 일 때 cladding 온도를 530 $^{\circ}$ C에서 부터 450 $^{\circ}$ C까지 변화시키면서 cladding 한 시편의 단면사진이다. 510 $^{\circ}$ C에서 cladding 한 시편은 홈깊이 0.4 mm도 완전하게 cladding 재가 채워지지 않았다. Cladding 온도가 변하여도 cladding 정도는 거의 변화를 보이지 않는다. 이러한 현상은 nipple과 die 사이의 거리가 0.5mm로 매우 가깝기 때문에 cladding 시에 심봉을 압착하는 힘이 작은 것으로 생각된다.

Fig. 5는 cladding nipple과 die 사이의 거리가 0.9 mm 일 때 cladding 온도를 530 $^{\circ}$ C에서 부터 450 $^{\circ}$ C까지 변화시키면서 cladding 한 시편의 단면사진이다. 530 $^{\circ}$ C에서 cladding 한 시편은 홈깊이 1.0 mm까지 cladding 재가 채워져 있고, 홈깊이 1.2 mm 이상에서는 cladding 재가 채워지지 않았다. Cladding 온도가 510 $^{\circ}$ C, 490 $^{\circ}$ C로 변하면 cladding 재가 채워지는 정도가 좋아진다. 그러나 cladding 온도가 450 $^{\circ}$ C로 낮아지면 cladding 재료의 채워지는 정도가 나빠진다. 즉 cladding 재가 채워지는 정도는 530 $^{\circ}$ C에서 온도가 감소하면서 좋아지나 450 $^{\circ}$ C에서는 좋지 않다. 이러한 현상은 cladding 온도가 530 $^{\circ}$ C에서 cladding 재인 Al 1060의 유동도가 높아서 심재를 압착할 때 die 와의 마찰력이 작아 die에서 빠져나가 심재를 강하게 압착하지 못하기 때문이라 생각된다. 반면 450 $^{\circ}$ C에서는 cladding 재인 Al 1060의 유동도가 낮아 심재를 압착하여도 홈속 깊이 채워지지 않는 것

으로 생각된다.

Fig. 6은 cladding nipple과 die 사이의 거리가 1.6 mm 일 때 cladding 온도를 530℃에서 부터 450℃까지 변화시키면서 cladding 한 시편의 단면사진이다. 홈깊이 1.6mm 까지 완전하게 cladding 재가 채워지며 cladding 온도가 변하여도 cladding 정도는 변하지 않는다. 이때 심봉의 앞부분 일부는 직경이 $\phi 6.1 - 6.2$ 로 약간 줄어들어 nipple과 die 사이 거리는 1.6mm 가 최대치인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 510℃에서 cladding 한 시편의 cladding nipple과 die 사이의 거리에 따른 cladding 강도를 나타낸 것으로 cladding nipple과 die 사이의 거리가 길어지면 cladding 강도는 증가한다.

Fig. 8은 nipple과 die 사이 거리가 0.9mm 일 때 cladding 온도변화에 따른 cladding 강도를 나타낸 것이다. Cladding 온도가 감소하면 cladding 강도는 증가하나 450℃에서는 감소한다. 이러한 현상은 Fig. 5에서와 같이 cladding 재의 유동도와 die와의 마찰력에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

핵연료봉을 cladding 할 때의 nipple과 die 사이의 거리가 0.5mm 일 때는 심재를 압착하는 힘이 작아 cladding 재와 심재의 접합상태가 약하며, nipple과 die사이의 거리가 2.0mm 이상되면 압착력이 증가되어 Al 1060 $\phi 6.35$ 심봉이 $\phi 5.8 - 6.2$ 로 줄어든다. 심봉이 압착을 받아 줄어드는 현상은 핵연료심의 uranium loading 변화를 초래하므로 cladding은 심봉이 줄어들지 않고 심재와 cladding 재가 압착이 잘 되어야 한다. 이러한 조건은 nipple과 die 사이 거리가 0.9 - 1.5mm 로 생각된다.

Cladding 온도가 높고 cladding 시간이 길면 핵연료심이 열영향을 받기 때문에 cladding 온도는 가능한 낮은 것이 좋다. 또한 cladding 시에 Al이 양쪽으로 나뉘어졌다가 다시 합쳐지는 deformation zone이 형성되는데 이때에 Al이 완전하게 용접/접합되기 위해서는 온도가 높아야 한다. 이러한 사항을 고려할 때 cladding 온도는 510℃가 좋을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. A Travelli, "The RERTR Program : A Prograss Report", in Proceedings of International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Gatlinberg, Tennessee, U.S.A., ANL/RERTR/TM-9, Nov.3-6, 1986 .
2. I.H. Kuk, C.K. Kim, C.T. Lee, "Uranium silicide Dispersion Fuel Utiliting Rapid Solidification by Atomization", U.S. Pat. No. 4,997,477. Mar. 5, 1991.
3. C. E. Pearson, R. N. Parkins, "The Extrusion of Metals" Barnes&Noble, Inc. pp31, 2nd ed. 1961.
4. A. Steimetz, "Doppeltwirkende Presse zum Ummanteln elektrischer Leiter mit Aluminium" Aluminium 46, pp230-234, 1970.
5. K. Laue, H. Stenger, " Extrusion ", American society for metals, pp75, 1981.

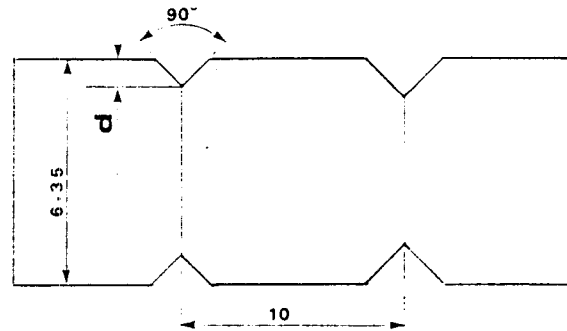


Fig. 1 Schematic diagram of the aluminum 6061 core.

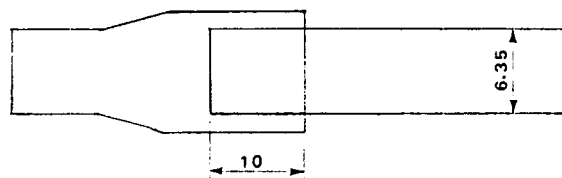


Fig. 2 Schematic diagram of the test specimen for the cladding strength

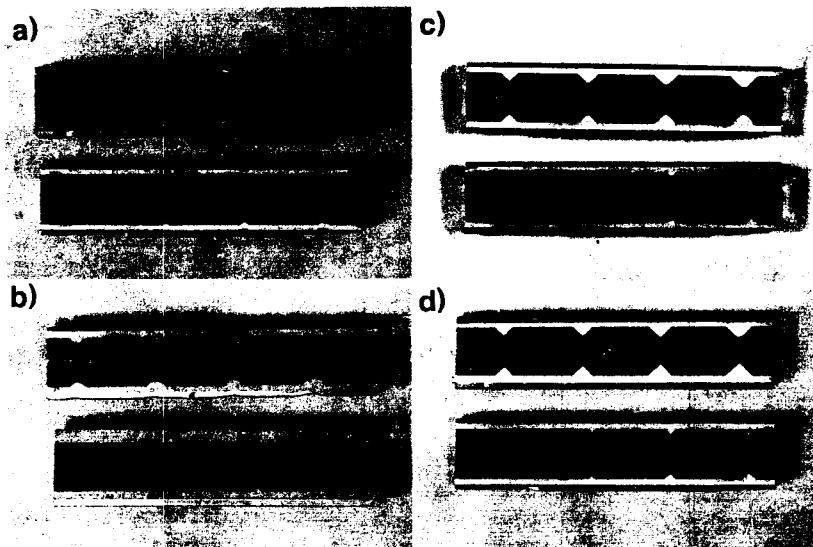


Fig. 3 Photo. of the cross-section of the cladded aluminum core at 530°C
a) D=0.5mm, b) D=0.9mm, c) D=1.27mm, d) D=1.6mm.

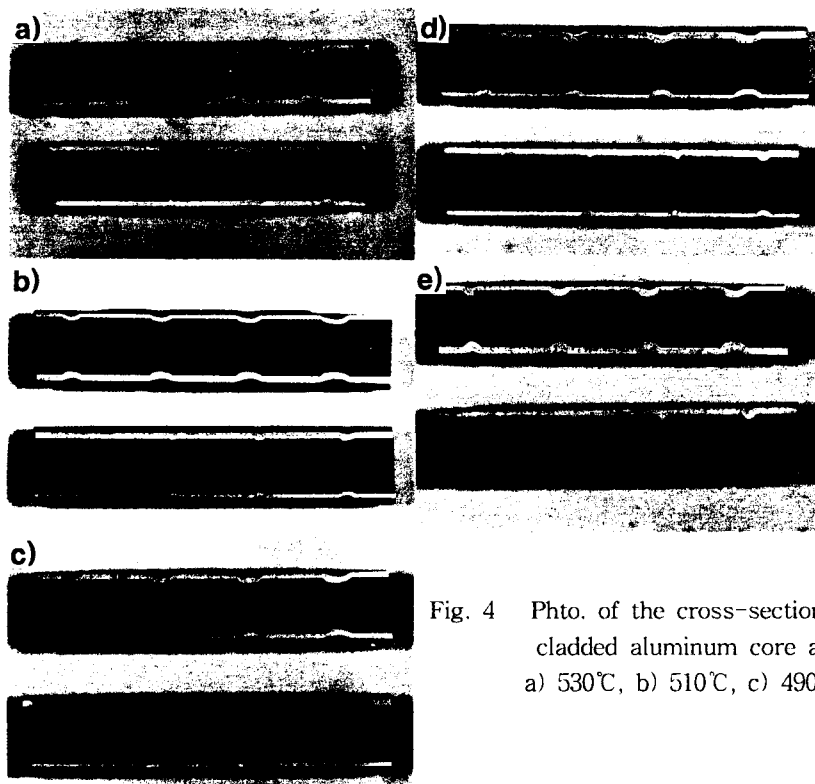


Fig. 4 Phto. of the cross-section of the cladded aluminum core at $D=0.5\text{mm}$.
 a) 530°C , b) 510°C , c) 490°C , d) 450°C .

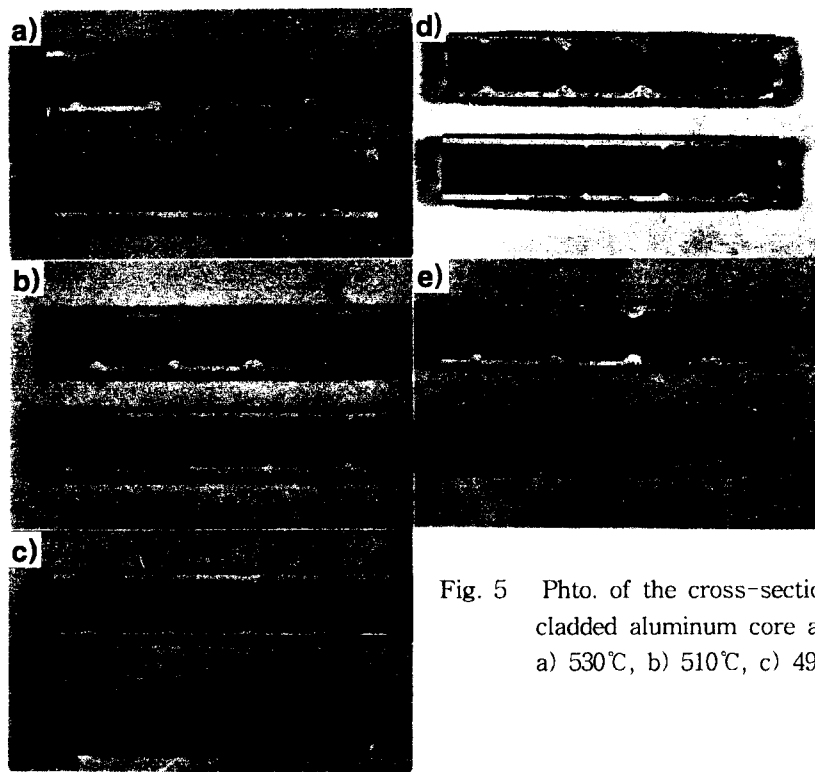


Fig. 5 Phto. of the cross-section of the cladded aluminum core at $D=0.9\text{mm}$.
 a) 530°C , b) 510°C , c) 490°C , d) 450°C

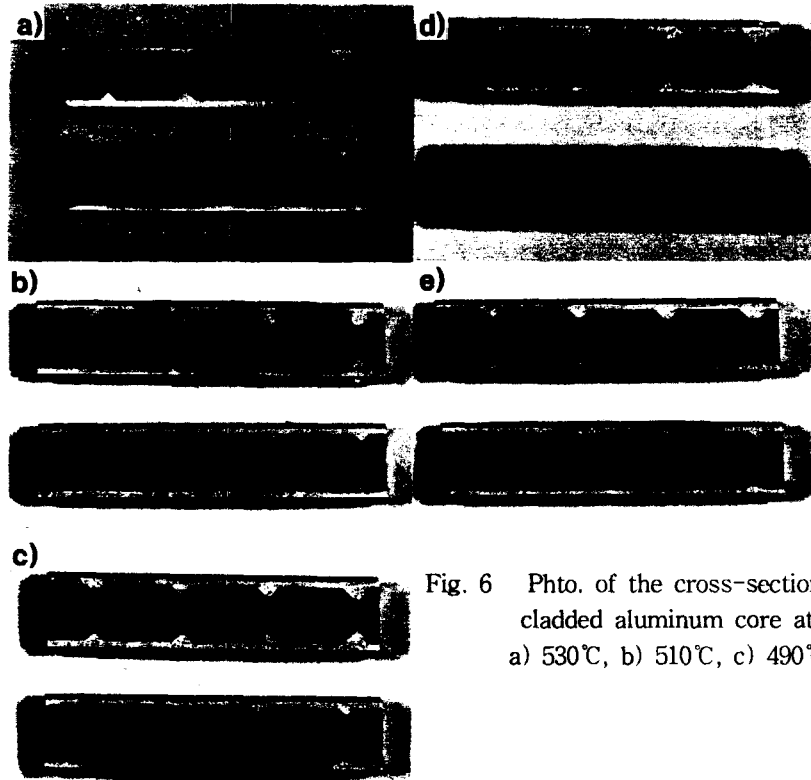


Fig. 6 Phto. of the cross-section of the cladded aluminum core at D=1.6mm. a) 530°C, b) 510°C, c) 490°C, d) 450°C

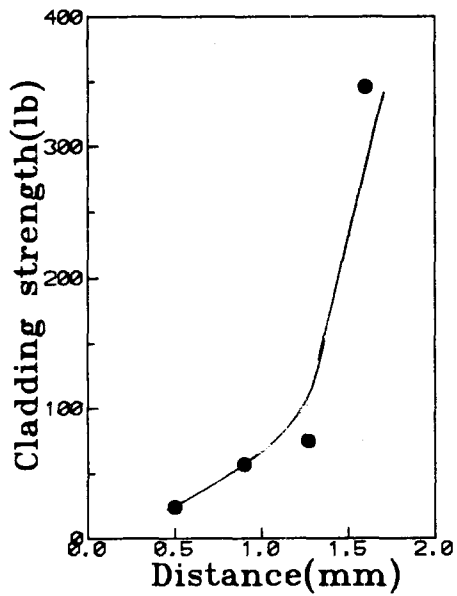


Fig. 7 Variation of the cladding strength with distance between nipple and die.

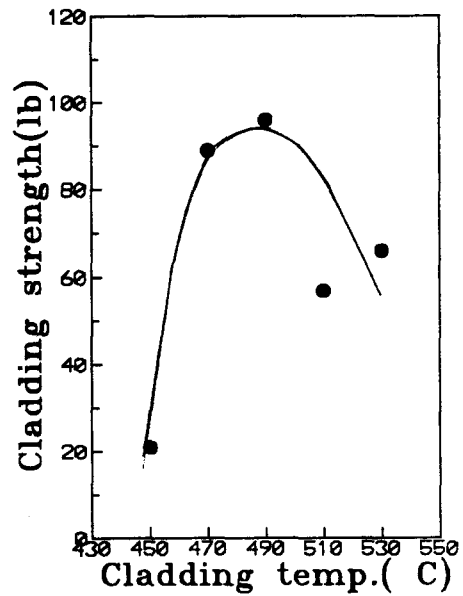


Fig. 8 Variation of the cladding strength with cladding temperature.